



Analýza vlivu povrchových vad a stárnutí kompozitního materiálu na mechanické vlastnosti

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Ondřej Helis**
Vedoucí práce: Ing. Martin Seidl, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Helis**
Osobní číslo: **S15000490**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Analýza vlivu povrchových vad a stárnutí kompozitního materiálu na mechanické vlastnosti**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rešerše a popis aktuálního stavu.
2. Teoretický popis technologií využitých v rámci výroby pátých dveří automobilů z polymerních materiálů.
3. Příprava vzorků a realizace experimentálních měření mechanických vlastností.
4. Tabulkové a grafické vyhodnocení získaných dat.
5. Diskuse výsledků a závěr.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vyd. ČR: Scientia, 2012. ISBN 978-80-86960-29-6.
[2] ELMARAKBI, Ahmed. *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*. 1st. UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014. ISBN 978-1-118-42386-8.
[3] HODGKINSON, J. M. *Mechanical testing of advanced fibre composites*. 1st. UK: Boca Raton: CRC Press, 2000. ISBN 978-1-85573-312-1.
[4] CHUNG, Deborah D.L. *Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies*. 2nd. UK: Springer - Verlag, 2004. ISBN 978-1848828308.
[5] TALREJA, Ramesh a Chandra VEER SINGH. *Home Browse by Subject Science and Engineering Engineering Materials Science Damage and Failure of Composite Materials Damage and Failure of Composite Materials*. 1st. UK: University Press Print Publication, 2012. ISBN 9780521819428.
[6] DAVIES, G. *Materials for Automobile Bodies*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003. s. 277. ISBN 0-7506-5692-1.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Seidl, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání bakalářské práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. dubna 2018**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.


Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 3. 7. 2017

Podpis: 

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Martinu Seidlovi, Ph.D., za velice odborné a podrobné konzultace, bez kterých bych nebyl schopen tuto práci vypracovat.

Abstrakt:

Cíl této práce spočívá v analýze dopadů přítomnosti vad v kompozitech s PUR matricí na vybrané mechanické vlastnosti. Teoretická část je zaměřena na obecné seznámení se s plasty a kompozity. Následně je zde probrána technologie výroby kompozitu metodou HP-RTM a popis nejčastějších vad kompozitu vznikající při této výrobě. V závěru teoretické části je probrána norma ASTM D3039-D3039M-14 zabývající se statickou zkouškou na tah. V praktické části je následně dle této normy provedeno měření kompozitů se specifikovanými vadami a jejich srovnání. Dále pak ověření kvality kompozitu bez vad srovnáním teoretických a naměřených parametrů kompozitu. Na závěr byl proveden výpočet složení kompozitu v místě vady.

Klíčová slova: Kompozit, ASTM D3039, statická zkouška tahem, vady kompozitu, HP-RTM

Abstract:

The aim of this work is to determine strength and elastic differences in composites. The theoretical part is focused on general knowledge of plastics and composites. It describes production of composite made by HP-RTM method and description of the composite defects produced during its production. At the end of the thesis is short description of ASTM D3039-D3039M-14, which explain theory of the static pull measurements test. In the practical part, composite measurement and comparison are subsequently made. At the end of this section, composite quality control was performed without defects by comparing the theoretical and measured composite parameters. Finally, a composite composition was calculated in the place of defects.

Key words: Composite, ASTM D3039, static stress test, composite defects, HP-RTM

OBSAH

1. ÚVOD.....	11
2. Teoretická část	12
2.1. Polymery	12
2.1.1. Termoplasty	13
2.1.2. Reaktoplasty.....	15
2.1.3. Elastomery/Kaučuky	17
2.1.4. Termoplastické elastomery.....	18
2.2. Kompozity	19
2.2.1. HP RTM.....	22
2.2.2. definování vad kompozitů ve výrobní praxi	23
2.3. Statická zkouška tahem dle ASTM D3039-D3039M-14.....	26
2.4 Teoretické výpočty	29
2.4.1 Výpočet poměrů složení kompozitu	29
2.4.2 Teoretický výpočet modulu pružnosti v tahu.....	30
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	32
3.1 Příprava a tvorba zkušebních vzorků:	32
3.1.1. Předběžný výpočet trhací síly.....	32
3.1.2 Výroba kompozitních desek se specifickými vadami	33
3.1.3. Řezání desek na kompozitní vzorky	35
3.2 Měření vzorků na tahové zatížení dle normy ASTM D3039-D3039M-14	36
3.2.1. Příprava vzorků před měřením	36
3.2.2. Měření tahové zkoušky	37
3.2.3. Měření velikosti nasycení kompozitu	39
4. VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY	40
4.1. Výsledné naměřené hodnoty napětí a prodloužení.....	40
4.1.1 Naměřené hodnoty vzorků bez vad	40
4.1.2 Naměřené hodnoty pro vadu zestárnutí kompozitu.....	41
4.1.3 Naměřené hodnoty vady s Ice flowers.....	43
4.1.4 Naměřené hodnoty vady s červíky.....	44
4.1.5 Naměřené hodnoty vady s velkoplošným poškozením červíky	45
4.1.6 Naměřené hodnoty vady neprosycení.....	46
4.2. Stanovení složení analyzovaných kompozitů.....	47
4.4. Teoretický výpočet modulu pružnosti v tahu	48
4.3. Porovnání vad	49
5. ZÁVĚR	53

POUŽITÁ LITERATURA	55
SEZNAM PŘÍLOH:.....	57

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Název
L_0	[mm]	Délka extenzometru
L_m	[mm]	Délka zkušební oblasti
L_v	[mm]	Celková délka vzorku
L_c	[mm]	Délka pro uchycení
W	[mm]	Šířka vzorku
H	[mm]	Výška vzorku
S	[mm ²]	Průřez vzorku
V	[mm ³]	Objem
E	[Mpa]	Modul pružnosti v tahu
E_{cp}	[Mpa]	Modul pružnosti v tahu kompozitu s 0° orientací
E_T	[Mpa]	Modul pružnosti v tahu kompozitu s 90° orientací
E_c	[Mpa]	Celkový teoretický modul pružnosti v tahu kompozitu
σ	[Mpa]	Napětí na vzorku
$\sigma_{0,1}$	[Mpa]	Napětí odečtené z měření při hodnotě $\varepsilon_{0,1}$
$\sigma_{0,3}$	[Mpa]	Napětí odečtené z měření při hodnotě $\varepsilon_{0,3}$
σ_m	[Mpa]	Maximální napětí na vzorku
$F_{1,c}^{t,u}$	[MPa]	Teoretická tuhost kompozitu
F_f^u	[MPa]	Tuhost E-skla
F_{min}	[N]	Minimální síla nutná k přetržení kompozitu
F_m	[N]	Maximální síla nutná k přetržení kompozitu
m_f	[g]	Hmotnost vláken
m_m	[g]	Hmotnost matrice
m_c	[g]	Celková hmotnost
ρ_c	[g/mm ³]	Hustota kompozitu
ρ_m	[g/mm ³]	Hustota matrice
ρ_f	[g/mm ³]	Hustota vláken

Symbol	Jednotka	Název
v	[mm/min]	Rychlost trhání
v_m	[%]	Objemový poměr matrice
v_d	[%]	Objemový poměr dutin
v_{ft}	[%]	Podíl vláken namáhaných v tahu
v_f	[%]	Podíl vláken v kompozitu
ε	[%]	Prodloužení vzorku
ε_{0,1}	[%]	0,1 % prodloužení
ε_{0,3}	[%]	0,3 % prodloužení
CV	[%]	Procento chyby měření
N	[-]	Celkový počet prvků
x_i	[-]	Hodnota i-tého členu
\bar{x}	[-]	Aritmetický průměr
s_{n-1}	[-]	Směrodatná odchylka
ξ	[-]	Míra vyztužení kompozitu

Zkratka	Název
ASTM	American Society for Testing and Materials – mezinárodní normalizační společnost se sídlem ve West Conshohocken, Pennsylvania, USA
HP-RTM	High Pressur Resin Transfer Moulding – vysokotlaké reakční vstřikování
PP	Polypropylen (lineární)
PE	Polyethylen
PS-GP	Polystyren
PVC-U	Polyvinilchlorid (tvrdý)
PMMA	Polymethylmetakrylát
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon)
POM	Polyoxymethylen
ABS	Akrylonitril-butadien styren
PF	Fenolformaldehydová pryskyřice (bakelit)

Zkratka	Název
NR	Přírodní kaučuk
MF	Melaminoformaldehydová pryskyřice
IR	Izoprénový kaučuk
SBR	Butadienstyrenový kaučuk
BR	Butadienový kaučuk
EPDM	Ethylenpropylenový kaučuk
IIR	Butylkaučuk
CR	Chloroprenový kaučuk
NBR	Butadienakrylonitrilový kaučuk
ACM	Akrylátový kaučuk
OT	Polysulfidový kaučuk
MQ	Silikonový kaučuk
FPM	Fluoriuhlíkový kaučuk
TPE-O	Termoplastický polyolefin
TPE-S	Styrenová směs na bázi polyolefinu a SBS, SEBS nebo SEBS
TPE-V	Vulkanizovaná směs PP/EPDM
TPE-E	Kopolyesterová směs
TPE-U	Termoplastický polyuretan
TPE-A	Termoplastický polyamid
SBS	Styren-butadien-styren
SEBS	Styren-ethylen-butylen-styren
SEPS	Styren-ethylen-(ethylen-propylen) –styren
UP	Polyesterová pryskyřice (skelné lamináty)
PUR	Polyuretanová pryskyřice
EP	Epoxidová pryskyřice
UF	Močovinoformaldehydová pryskyřice

1. ÚVOD

Automobilový průmysl v dnešní době zažívá velké změny v podobě výrazného zvýšení výroby elektromobilů. Tyto alternativní pohony sice při jízdě neprodukují zplodiny, ale oproti tradičnímu řešení je elektromobil ve srovnatelné kategorii mnohem těžší než automobily se spalovacími motory. Důvodem je nutnost instalovat do vozidla velké množství baterií, které jsou velmi těžké, což vytváří nové požadavky na další díly a součásti, které by měly být co nejlehčí. Tyto okolnosti umožňují vyšší rozsah využití plastů a kompozitů jako konstrukčních materiálů v automobilovém průmyslu.

Plasty mají velká pozitiva při použití v konstrukci. Nejrozšířenější technologií v rámci zpracování plastů je vstřikování, které umožňuje výrobu velmi tvarově komplexních součástí s množstvím vyztužujících profilů. Takto vyprofilované tenkostěnné struktury vykazují srovnatelnou tuhost jako díly tvářené z plechů. Ve výsledku je proto možné vyrobit konstrukci se srovnatelnými mechanickými vlastnostmi jako při použití plechů o celkově nižší hmotnosti. Polymerní kompozity se spíše využívají u dražších automobilů, jelikož jsou cenově nákladnější. Tato nevýhoda je ale kompenzována jejich velkou pevností při zachování velmi malé hmotnosti. Proto při použití těchto materiálů lze u elektromobilů nést větší počet baterií, čímž se jim náležitě prodlužuje maximální vzdálenost dojezdu. Při použití neplněných plastů na výrobu pohledových dílů a kompozitů jakou vyztužujícího prvku nesoucího většinu hlavního zatížení lze výslednou cenu celé konstrukce snížit.

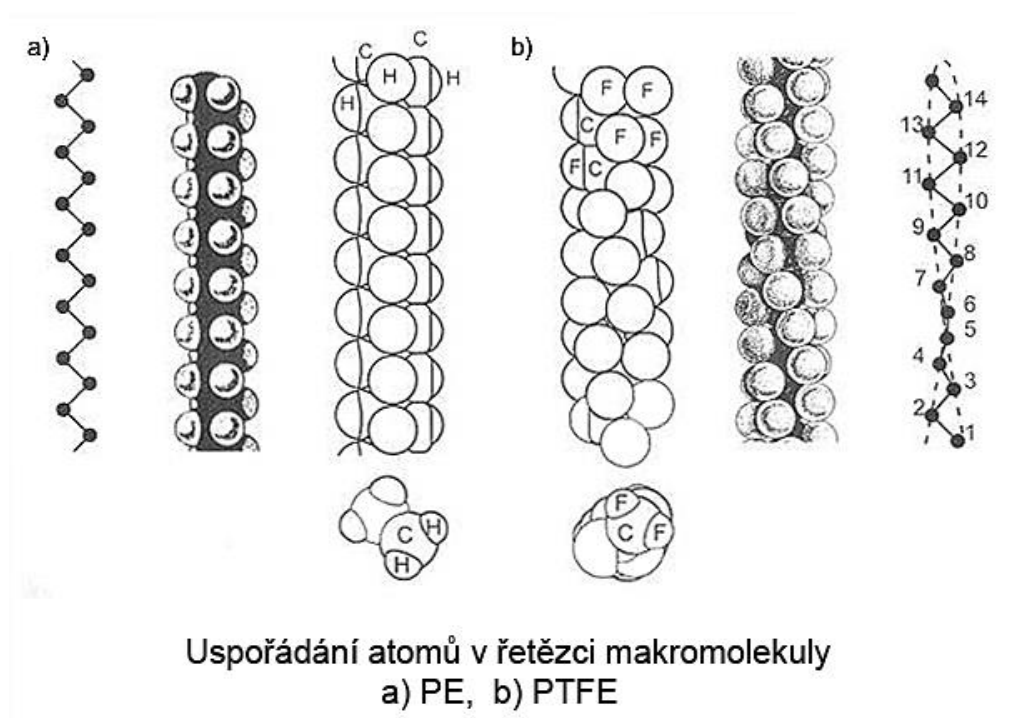
Polymerní kompozit s funkcí vyztužujícího prvku je využíván například při výrobě pevnostního rámu při konstrukci pátých dveří. Ten je tvořen ovinem skelných nebo uhlíkových vláken kolem nosného jádra s následným nasycením ovinu ochrannou polyuretanovou matricí. Z důvodu použití technologie HP-RTM při tvorbě rámu, kdy je při vysokém tlaku vstřikována matrice do formy, se na dílu mohou vytvářet drobné vady ve formě malých prohlubní a obrasců. Tyto povrchové defekty jsou následně zdrojem nejistoty, zda tyto vady negativně neovlivňují mechanické vlastnosti rámu a snižují jeho celkovou tuhost. Z těchto důvodů je cílem této práce ověřit vliv přítomnosti nejčastějších vad spojených s výrobním procesem tohoto typu kompozitu na výsledné mechanické vlastnosti produktu za využití destruktivní tahové zkoušky dle normy ASTM D3039-D3039M - 14..

2. Teoretická část

V této části jsou představeny polymery a kompozitní materiály. Dále je zde popsán proces výroby kompozitu metodou HPP-RTM a obecný popis vad vznikající touto metodou. Závěr teoretické části je zaměřen na popis destruktivní zkoušky tahem dle normy ASTM D3039-D3039M-14.

2.1. Polymery

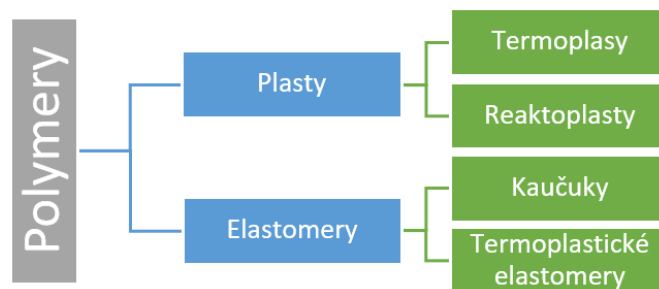
Jedná se především o materiály organického nebo syntetického původu složené převážně z atomů vodíku a uhlíku, případně dalších prvků jako jsou kyslík, dusík, chlor atd., které jsou složeny do makromolekul. Ty se jako články dlouhých řetězců (obr. 2.1) stále opakují a tím vytváří polymerní materiál. [1,2,3,7,9]



Obrázek 2.1: Řetězec makromolekul polymeru [9]

Zpracování polymerů je převážně založeno na vstřikování taveniny do formy. Jelikož mají polymery teplotu tání pohybující se nejčastěji v rozmezí od 100 °C do 350 °C, jsou na zpracování energeticky méně náročné, než je tomu u kovů, které mají teploty tání o několik set stupňů vyšší. [1,2,5]

Polymery lze dle působení teploty (obr. 2.2) dělit na termoplasty, reaktoplasty a elastomery, které se od sebe liší především svými vlastnostmi v pevném stavu. [2,3]

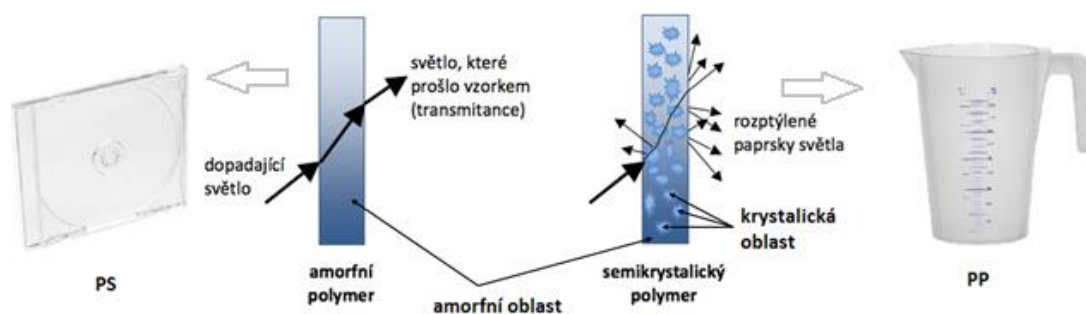


Obrázek 2.2: Základní dělení polymerů dle působení teplot [3]

- Termoplasty, na rozdíl od ostatních polymerů, mají schopnost se při opětovném ohřevu opakovaně uvést do plastického stavu. To umožňuje, aby byly opakovaně zpracovávány. [2,3]
- Reaktoplasty při ohřevu nad specifickou teplotu svou strukturu zesítují, což tomuto materiálu zabraňuje jeho opětovnému zpracování. Tato struktura je příčinou jejich celkově vyšší pevnosti, než mají standardní termoplasty a elastomery. [2,3]
- Elastomery jsou význačné svou vysokou elasticitou v tuhém stavu, což je způsobeno zesíťovanou strukturou, ale hustota zesíťení je na rozdíl od reaktoplastů velmi nízká. [2,3]

2.1.1. Termoplasty

Termoplasty (tab. 2.1) jsou specifické svou schopností při zahřívání nad teplotu tání přecházet do plastického stavu, což umožňuje jejich opětovné vstřikování do forem. Při chladnutí neprobíhají žádné chemické reakce, což zajišťuje reverzibilitu procesu tuhnutí. Této vlastnosti se velmi často využívá při výrobě velkého množství dílů, jelikož je možné recyklovat defektní výrobky nebo studené vtokové systémy (technologický odpad, pokud není zdegradovaný). Struktura termoplastů může být amorfní i semikrystalická (obr. 2.3). Klady a zápory použití jsou přehledně znázorněny v tabulce 2.2.[3,9]



Obrázek 2.3 Optické vlastnosti amorfní a semikrystalické struktury [3,11,12]



Tabulka 2.1: Nejčastěji používané termoplasty a jejich vlastnosti [25]

Název	Symbol	ρ [g/cm ³]	σ_m [MPa]	E [MPa]	T_g [C°]
Polypropylen (lineární)	PP	0,9 ÷ 0,91	34÷38	1 110÷1 500	160÷176
Polyethylen	PE	0,94÷0,96	20÷33	700÷1 400	130
Polystyren	PS-GP	1,05	46÷65	3 200	95
Polyvinylchlorid (tvrdý)	PVC-U	1,38÷1,55	50÷75	1 000÷1 350	85
polymethylmetakrylát	PMMA	1,17÷1,20	50÷77	3 800÷3 200	110
Polytetrafluorethylen (Teflon)	PTFE	2,15÷2,30	25÷36	400	328
Polyoxymethylen	POM	1,40÷1,42	165÷185	2 800÷3 200	165÷185
Akrylonitril-butadien styren	ABS	1,05	30÷45	1 900÷2 700	105

Vlastnosti termoplastů lze upravovat za pomoci vyztužujících nebo nevyztužujících plniv. Nejčastějšími plnivy jsou:

- Barviva: Změna barvy materiálu
- Nadouvadla: Slouží k vypěnění materiálu (nejčastěji využíváno u PS)
- Vyztužující prvky: Krátká skelná nebo uhlíková vlákna
- Jiný termoplast: Smícháním dvou typů materiálu lze vytvořit výsledný materiál o přiměřené ceně s optimální pevností pro danou konstrukci. [1,2,3,5,9]

Tabulka 2.2: Klady a zápory termoplastů [1,3,5,9]

	<div> <div>Levný materiál</div> <div>Recyklovatelný</div> <div>Netoxický</div> <div>Malá hustota materiálu</div> <div>Nízká energetická náročnost při zpracování</div> <div>Korozivzdorné</div> <div>Částečně pohlcují rázy</div> </div>		<div> <div>Nízká tepelná výdrž</div> <div>Creep</div> <div>Vznik deformací po vstřikování</div> <div>Poměrně dobrá hořlavost</div> <div>Poměrně malá pevnost</div> <div>Snadno poškoditelný povrch</div> </div>
---	--	---	---

Využití termoplastických dílů je v automobilovém průmyslu poměrně široké. U exteriérových dílů se především jedná o přední a zadní nárazníky (obr. 2.4 vlevo), přední masku automobilu, páte dveře, spoilery, boční lišty, blatníky atd. U interiérových dílů se především jedná o většinu vnitřního obložení vozu, palubní desku, loketní opěrku (2.4 vpravo), různé krytky atd.



Obrázek 2.4: Termoplastický nárazník (vlevo) a loketní opěrka (vpravo) [4]

2.1.2. Reaktoplasty

Jedná se o tavitelný materiál (tab. 2.3), který je v plastické fázi vstřikovatelný pouze po omezenou dobu. Po dopravení materiálu do formy je přidán vytvrzovací prostředek nebo je proveden další ohřev, což iniciuje nevratný proces, který uvede reaktoplast do nerozpustného a netavitelného stavu. Tato chemická reakce se nazývá vytvrzování a vytváří z původních molekul zesíťovanou strukturu, která je amorfní. Většina reaktoplastů je označována jako pryskyřice ale, lze se s nimi také velmi často setkat v podobě pěn. Klady a zápory použití jsou přehledně znázorněny v tabulce 2.4.[1,2,3,5,9]

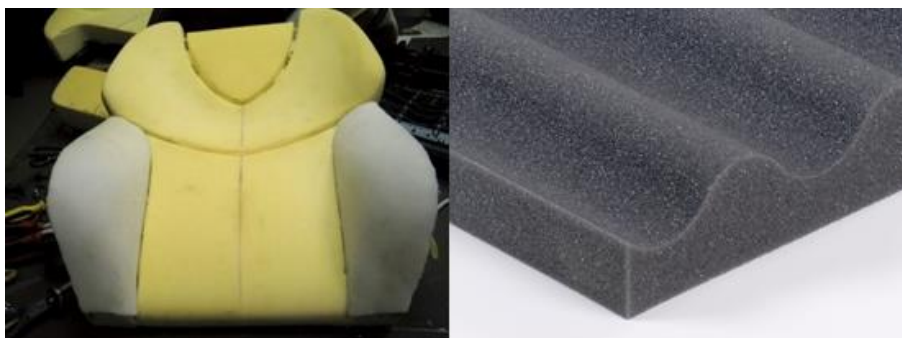
Tabulka 2.3: Klady a zápory reaktoplastů [3,9]

+	<p>Vysoká chemická odolnost</p> <p>Vysoká tepelná odolnost</p> <p>Vysoká tuhost materiálu</p> <p>Vysoká tvrdost materiálu</p> <p>Široké využití v podobě pěn</p>	-	<p>Nelze recyklovat</p> <p>Křehnutí pod vlivem UV záření</p> <p>Křehký materiál ve formě pryskyřic</p>
---	--	---	--

Tabulka 2.4: Nejčastěji používané reaktoplasty a jejich vlastnosti [25]

Název	Symbol	ρ [g/cm ³]	σ_m [MPa]	E [MPa]	T_g [C°]
Fenolformaldehydová pryskyřice (bakelit)	PF	1,25÷2,00	30÷40	3 500÷4 200	100÷170
Polyesterová pryskyřice (skelné lamináty)	UP	1,20÷1,50	40÷90	2 000÷4 500	70÷120
Polyuretanová pryskyřice	PUR	1,17	77	2 420	180
Epoxidová pryskyřice	EP	1,10÷1,40	35÷100	3 000÷6 000	-
Močovinoformaldehydová pryskyřice	UF	1,50÷1,20	30	5 000÷7 000	-
Melaminoformaldehydová pryskyřice	MF	1,50÷1,70	30	6 000÷10 000	100÷130

Nejčastější využití reaktoplastů je ve formě pryskyřic (obr. 2.6 vpravo), kdy zastávají roli matrice v kompozitu. Dále jsou často používané pěny (obr. 2.6 vlevo), přičemž nejznámějším představitelem je polyuretanová pěna vyráběná pod obchodním označením „Molitan“. Ty se využívají například jako materiál do autosedaček (obr 2.5 vlevo), matrace nebo jako akustický materiál atd. (obr. 2.5 vpravo). [2,3]



Obrázek 2.5: Autosedačka z molitanu (vlevo) [14] a akustický materiál (vpravo) [13]



Obrázek 2.6: PUR montážní pěna (vlevo) [15] a typické díly z reaktoplastu (vpravo) [22]

2.1.3. Elastomery/Kaučuky

Elastomer (tab. 2.5) se vyznačuje svou velmi vysokou elasticitou a nízkou tuhostí (obr. 2.7 vpravo), což zajišťuje jejich dobrou deformovatelnost i při zatížení poměrně malou silou, aniž by vznikalo nevratné porušení. U tohoto polymerního materiálu rovněž musí být ohřev proveden pouze po omezenou dobu. Poté (případně opět za přítomnosti iniciátorů, nejčastěji síry) se spustí chemická reakce v podobě prostorově řídkého zesítnění, která je také známá pod označením vulkanizace. Takto vytvořený materiál je nazýván pryží. Jako nejběžnější plnivo jsou využívány saze (UV stabilizátory). Klady a zápory použití jsou přehledně znázorněny v tabulce 2.6.[1,2,3,9]

Tabulka 2.5: Nejčastěji používané kaučuky a jejich použití [1]

Název	Symbol	Světová spotřeba [%]	Určení
Přírodní kaučuk	NR	32	Pro všeobecné použití
Izoprenový kaučuk	IR	3	
Butadienstyrenový kaučuk	SBR	37	
Butadienový kaučuk	BR	10	
Ethylenpropylenový kaučuk	EPDM	7	
Butylkaučuk	IIR	3	
Chloroprenový kaučuk	CR	3	Olejevzdorné
Butadienakrylonitrilový kaučuk	NBR	3	
Akrylátový kaučuk	ACM	0,5	
Polysulfidový kaučuk	OT	0,1	
Silikonový kaučuk	MQ	0,1	Teplovzdorné
Fluoruhlíkový kaučuk	FPM	0,1	

Vzhledem k širokým rozsahům vlastností je možné se setkat s elastomery prakticky v jakémkoli přístroji. U automobilů jsou nejčastěji využívány pro výrobu pneumatik (obr 2.7 vlevo), těsnění, hadic, řemenových pásů, pryžových pružin atd. [3,9]



Obrázek 2.7: Pryžová pneumatika (vlevo) [17 a, ukázka elastických vlastností elastomeru (vpravo) [18]

Tabulka 2.6: Klady a zápory kaučuků [1,2,3,7]

<div data-bbox="419 237 555 376" data-label="Image"></div> <p>Materiál je velmi elastický</p> <p>Při zatížení silou většinou nevznikají trvalé deformace</p>	<div data-bbox="1086 286 1203 336" data-label="Image"></div> <p>Rozpouštění v aromatických uhlovodících(benzín, benzen)</p> <p>Rozpouštění v chlorovaných rozpouštědlech</p> <p>Materiál bobtná v olejích</p> <p>Nelze recyklovat</p> <p>Materiál časem degraduje</p>
--	---

2.1.4. Termoplastické elastomery

Termoplastický elastomer (tab. 2.7) je materiál obsahující elementy se zesíťovanou strukturou. Ta je tvořena tuhými oblastmi z termoplastu, které tvoří uzly sítě a měkkými částmi tvořenými elastomery. Tato struktura vytváří elastický materiál podobný pryží. Na rozdíl od nich ale při zahřátí znovu přechází do plastického stavu. Klady a zápory použití jsou přehledně znázorněny v tabulce 2.7.[3,16]

Tabulka 2.7: Nejčastěji používané termoplastické elastomery [16]

Název	Zkratka
Termoplastický polyolefin	TPE-O
Styrenová směs na bázi polyolefinu a SBS, SEBS nebo SEBS	TPE-S
Vulkanizovaná směs PP/EPDM	TPE-V
Kopolyesterová směs	TPE-E
Termoplastický polyuretan	TPE-U
Termoplastický polyamid	TPE-A

Termoplastické elastomery se využívají na těsnění oken automobilů (obr. 2.8 vpravo), kryty airbagů, pláště kabelů, střešní membrány, automobilové rohožky (obr. 2.8 vlevo), měkké dotykové části nástrojů atd.



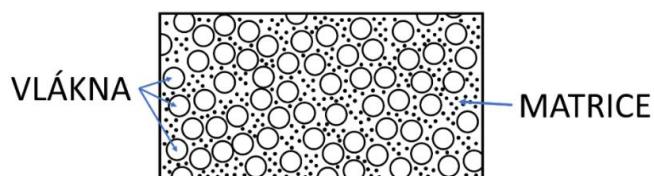
Obrázek 2.8: Automobilová rohožka (vlevo) [4] a těsnění automobilu (vpravo) [4]

Tabulka 2.8: Klady a zápory termoplastických elastomerů [3,16]

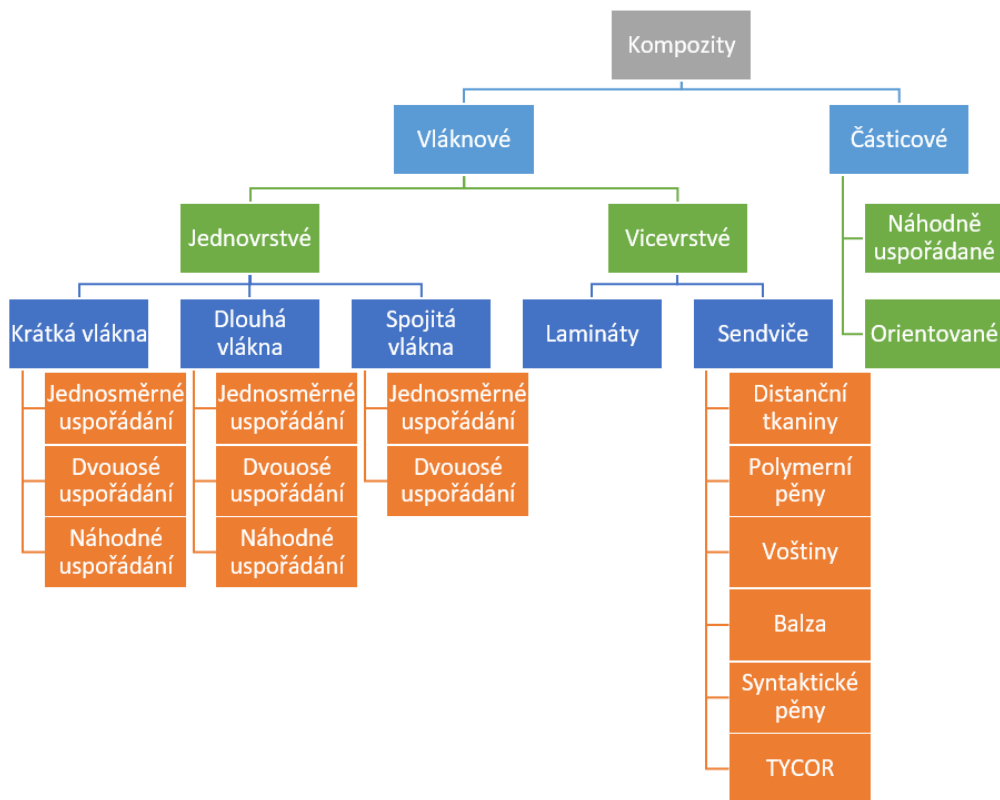
<div style="color: green; font-size: 2em; float: left; margin-right: 10px;">+</div> <div> Materiál je elastický Lze recyklovat Lze využít vstřikolisy určené na termoplasty </div>	<div style="color: brown; font-size: 1.5em; float: right; margin-left: 10px;">-</div> <div> Méně elastický než pryž Nižší tepelná odolnost Nižší chemická odolnost Při velkém zatížení vznikají trvalé deformace </div>
--	--

2.2. Kompozity

Kompozit (obr. 2.10) je materiál skládající se ze dvou a více složek (obr. 2.9). Ty se od sebe výrazně liší svými fyzikálními i chemickými vlastnostmi a vytváří unikátní pevnou látku s vlastnostmi, které samostatné složky neměly. Kompozit je primárně složen z matrice a vyztužujících elementů. [6,4,10]



Obrázek 2.9: Složení vláknového kompozitu [21]



Obrázek 2.10: Obecné rozdělení kompozitů [10]

Výztuž je především velmi pevný materiál, který přenáší většinu silového napětí a je nejčastěji ve formě vláken (obr. 2.11). Vlákná jsou specifická tím, že jejich pevnost v tahu ve směru hlavní osy (orientace) je mnohonásobně vyšší ve srovnání s dalšími kompaktními formami, které může daný materiál tvořit. Dále platí, že pevnost vlákna je přímo závislá na velikosti jeho průřezu. To znamená, že se zmenšujícím se průřezem vzrůstá jeho pevnost. Velikost průřezu vlákna používaná v kompozitech je od 0,05 do 0,2mm. Až 90 % celkového napětí přenáší výztužná vlákna i při pouhém 10 % obsahu v kompozitu. [6,7,19,20,21]

Druhy výztuží kompozitu dle použitého materiálu: [6,10]



- Skelná
- Uhlíková
- Polymerní
- Keramická
- Kovová atd.



Obrázek 2.11: Druhy výztuží kompozitu dle jejich velikosti [26]

Využití vláken jako výztuže s sebou přináší i svá negativa, protože z pohledu přenosu sil působí podobně jako lano. To znamená, že v ostatních směrech (mimo orientaci hlavní osy vláken) je efektivita přenášení silového zatížení nižší. Při 90° orientaci vláken s ohledem na směr působícího napětí je přenos sil uskutečňován pouze přes matici. Proto je vhodné volit orientaci vláken podle směru maximálního zatížení. Tento problém je řešen přidáním více vrstev vláken o různých orientacích. Obvyklé konfigurace jsou 0°/90°, +30°/-30° a +45°/-45°. Klady a zápory použití jsou přehledně znázorněny v tabulce 2.9.[6,7,10,19]

Tabulka 2.9: Klady a zápory kompozitů [6,7,10,19]

 <p>Nízká hmotnost Vysoká pevnost Vysoká mez únavy Lze jimi nahrafit většinu dnešních materiálů</p>	 <p>Velmi snížena pevnost kompozitu mimo hlavní směr vláken Drahý materiál Nutná povrchová úprava vláken Toxické výpary při výrobě Náročná manipulace s vlákny</p>
--	---

Matrice je materiál, který vyplňuje prázdné prostory mezi vlákny a tvoří tak kontinuální fázi kompozitního systému. Rovněž má specifickou funkci, kterou je primárně dobrá zpracovatelnost celého systému, ochrana vláken a rovnoměrné přenášení vnějšího zatížení na vyztužující elementy. Pro správnou funkčnost kompozitu je nutné, aby matrice byla s vyztužujícími vlákny pevně spojena. Toho lze docílit za pomoci adhezních činidel nebo povrchovou úpravou vláken. [6,7,10,19]

Dělení typů matrice [6,10]:

- Polymerní
- Kovová
- Uhlíková
- Skleněná
- Sklokeramická
- Keramická

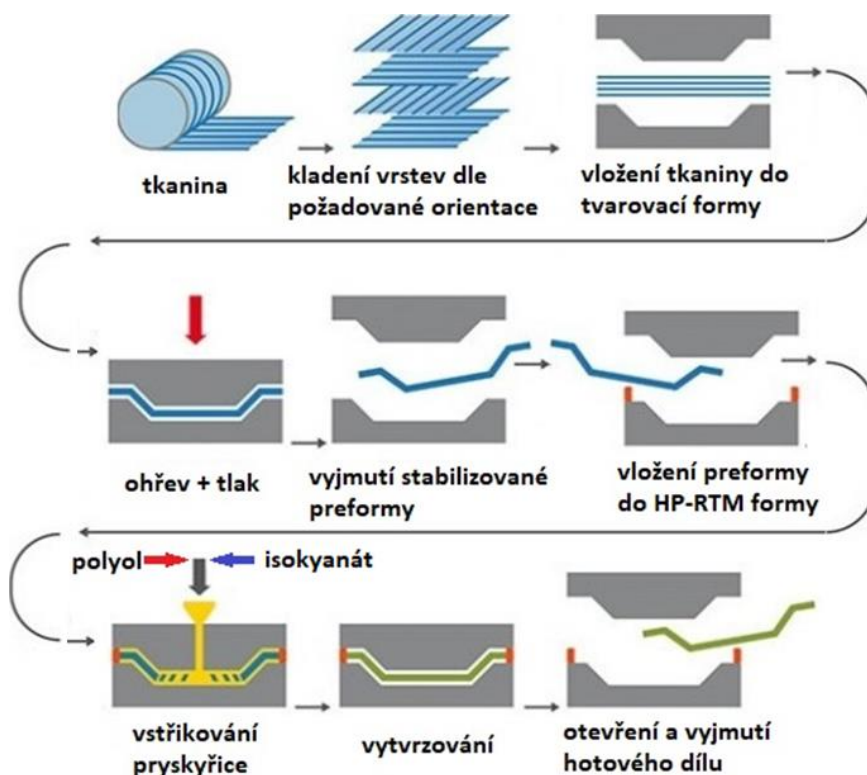
Kompozitní materiály jsou využívány především u konstrukcí, kde je kladen maximální důraz na pevnost materiálu při zachování nízké hmotnosti (obr. 2.12 vpravo). Proto lze kompozity nejčastěji nalézt v leteckém průmyslu. Dále jsou velmi často využívány u elektromobilů (obr. 2.12 vlevo), kde je velmi důležité dosáhnout co nejnižší hmotnosti konstrukce. [7,10]



Obrázek 2.12: Kompozitní díly BMW i3 (vlevo) [26] a další kompozitní díl (vpravo) [27]

2.2.1. HP RTM

HP RTM neboli High Pressur Resin Transfer Moulding je technologie pro tvorbu kompozitních dílů za využití vysokotlakého vstřikování (obr. 2.13). Vysoký tlak napomáhá dobrému promíchání složek polymeru (nejčastěji polyol a isokyanát) v mísící hlavě. Tato směs o viskozitě vody je následně vstřikována do formy. Zde jako matrice kompozitu zasycuje již předem připravená výztužná vlákna. Po přivedení tepla do formy začíná chemická reakce, která po několika minutách vytvrdí matrici. Jako výztužná vlákna jsou nejčastěji používána skelná nebo uhlíková vlákna ve formě rohože nebo dlouhých (nekonečných) vláken. Výhodou této výrobní technologie je produkce velkoplošných dílů s velkou rozměrovou přesností a s hladkým povrchem. Tato metoda je velice často používáno při výrobě kompozitních rámců, kabin automobilů atd. [8,28]



Obrázek 2.13: Schéma tvorby kompozitního dílu metodou HP-RTM [8]

2.2.2. definování vad kompozitů ve výrobní praxi

Při použití výrobní technologie HP-RTM je u velmi tvarově složitých součástí poměrně vysoké riziko vzniku defektů. Tyto vady zasahují maximálně několik procent celkové plochy kompozitního dílu. Ve výrobní praxi jsou díly dle kvality povrchu děleny takto:

- **Kompozitní díl bez vad** (obr. 2.14) je charakteristický hladkým povrchem, který je bez jakýchkoliv nerovností (dokonalý obtisk povrchu formy). Při vstřikování PUR bez přítomnosti dalšího plniva má kompozit jednotnou bělavou barvu. Samotná matrice z PUR epoxidu je průhledná (amorfní). Bílá barva je zapříčiněna jiným lomem světla na výztuži ze skelných vláken.



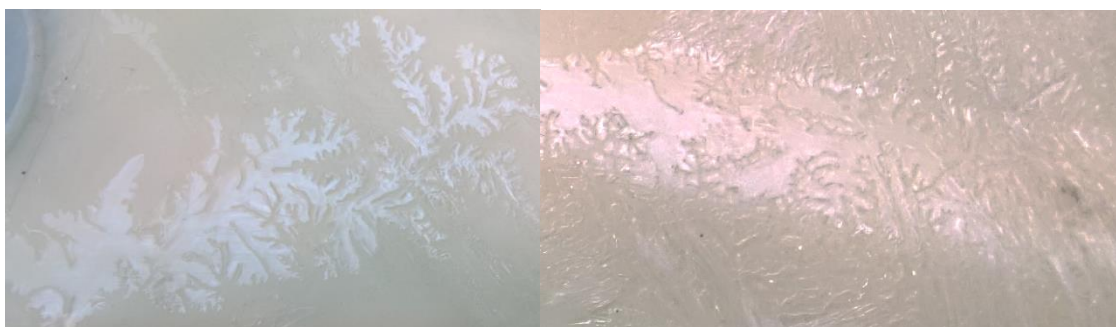
Obrázek 2.14: Část kompozitu bez vad

- **Zestárnutí kompozitu** (obr. 2.15) je primárně způsobeno dlouhodobým vystavením teple a UV záření. Strukturní změny a degradace polymerní matrice jsou signalizovány změnou barvy (z bílé na sytě nažloutlou barvu).



Obrázek 2.15: Zestárnutý kompozit

- Označení **Ice flowers** (obr.2.16 vlevo) je využíváno pro mělké povrchové poškození kompositu. Vada převážně vytváří ozdobný vzor vzhledově velice podobný ledové námraze. Hloubka vady se většinou pohybuje od 0,01 mm do 0,1 mm. Rozměrová velikost této vady je velice rozmanitá a pohybuje se od jednotek mm² v zárodku až po celkové velkoplošné obrazce o rozloze převyšující i 1000 mm² (obr. 2.16 vpravo). Lze konstatovat, že tato vada má vždy ucelené jádro s hlavní větví, dosahující největší hloubku, která se následně rozvětňuje. Pokud je vzduchová mezera větší, přechází tento vzor do větší hloubky a vytváří tzv. červíky



Obrázek 2.16: Ice flowers (vlevo) a celoplošný obrazec s ice flowers (vpravo)

- Označení **Červíci** (obr. 2.17) je užíváno pro vady vzhledem podobné mělkým drážkám, nebo drobným tunelům podobným těm, co tvoří hmyz. Tato vada nezasahuje do prosycení vyztužující tkaniny. Může vytvářet na povrchu drážky o hloubce 0,1÷0,7 mm. Je možné nalézt červíka i jako uzavřenou vzduchovou kapsu kdy nad sebou má poměrně tenkou polyuretanovou vrstvu matrice, která nejčastěji dosahuje tloušťky od 0,01 do 0,2 mm.



Obrázek 2.17: Červíci

- **Velkoplošné poškození červíky** (obr. 2.18) je z pohledu tvaru vady identické s vadou červíku. Největší rozdíl je v rozsahu zasažené oblasti, kde namísto jednoho lokálního červíka vzniká velkoplošné poškození touto vadou.



Obrázek 2.18: Velkoplošné poškození červíky

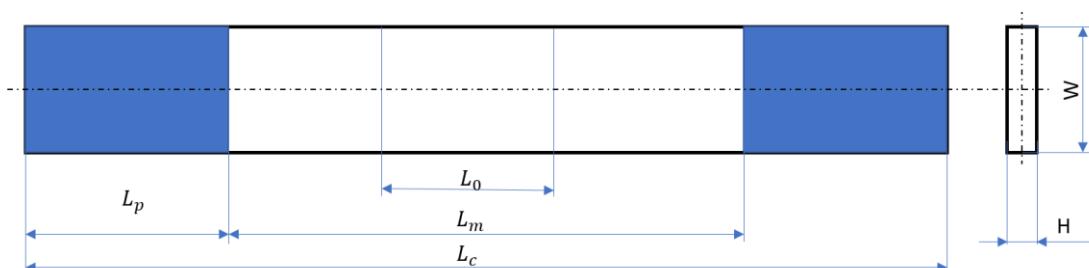
- **Neprosycení** (obr. 2.19) je z pohledu tuhosti velmi vážná vada kompozitního dílu. Tkanina v daném místě je neprosycena matricí. Vyztužující vlákna jsou kompletně obnažena bez přítomnosti PUR matrice. Samotná vlákna vystupují na povrchu kompozitu a lze je za pomoci nože odstranit.



Obrázek 2.19: Neprosycený kompozit s obnaženými vlákny kompozitu

2.3. Statická zkouška tahem dle ASTM D3039-D3039M-14

Jedná se o jednu ze základních destruktivních zkoušek určených specificky pro hodnocení mechanických vlastností kompozitů. Jako zkušební těleso se používá obdélníková deska, jejíž rozměry vycházejí z požadavků normy (viz obr. 2.20 a tab. 2.10). [30]



Obrázek: 2.20: Rozměry zkušební vzorku

Tabulka 2.10: Veličiny používané při výpočtu normy ASTM D3039-D3039M-14

Název veličiny	Symbol	Jednotka	Název veličiny	Symbol	Jednotka
Délka extenzometru	L_0	[mm]	Prodloužení vzorku	ε	[%]
Délka zkušební oblasti	L_m	[mm]	Napětí na vzorku	σ	[Mpa]
Celková délka vzorku	L_p	[mm]	Modul pružnosti v tahu	E	[Mpa]
Délka pro uchycení	L_c	[mm]	Průměrná hodnota	\bar{x}	[-]
Délka při zatížení	L	[mm]	Směrodatná odchylka	s_{n-1}	[-]
Šířka vzorku	W	[mm]	Chyba měření	CV	[%]
Výška vzorku	H	[mm]	Počet vzorků	n	[-]
Průřez vzorku	S	[mm ²]	Hodnota i-tého vzorku	x_i	[-]
0,1 % prodloužení	$\varepsilon_{0,1}$	[%]	Napětí při $\varepsilon_{0,1}$	$\sigma_{0,1}$	[Mpa]
0,3 % prodloužení	$\varepsilon_{0,3}$	[%]	Napětí při $\varepsilon_{0,3}$	$\sigma_{0,3}$	[Mpa]

Pro výpočet hodnot nutných k určení výsledků měření statické zkoušky tahem je nutné použít dané vzorce:

- Průřez vzorku

$$S = W \cdot H \quad (1)$$

- Napětí ve vzorku

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

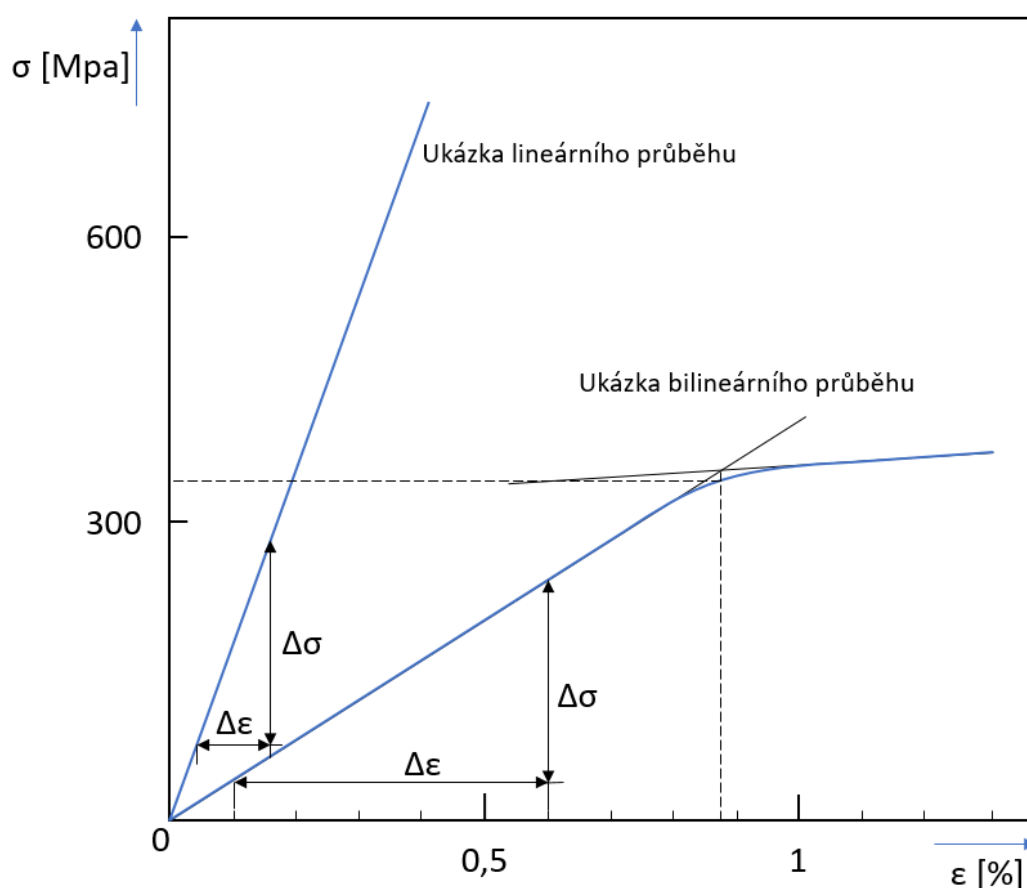
- Poměrné prodloužení

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (3)$$

- Určení velikosti modulu pružnosti v tahu (E)

$$E = \frac{\sigma_{0,3} - \sigma_{0,1}}{\varepsilon_{0,3} - \varepsilon_{0,1}} \quad (4)$$

Modul pružnosti v tahu kompozitu je určen z rozdílů hodnot napětí a poměrného prodloužení v místě 0,1% absolutního poměrného prodloužení. Dle normy je doporučeno použít rozdíl mezi $\varepsilon_{0,1}$ a $\varepsilon_{0,3}$ o velikosti 0,002 maximálního poměrného prodloužení. Pro speciální případy (viz. obr.2.21) lze využít i jiné rozmezí. To se především používá pro kompozity při poměrném prodloužení menším než $\varepsilon = 0,5\%$. Zde je počáteční bod pro měření $\varepsilon_{0,1}$ na hodnotě 25% změřeného prodloužení. Stanovení velikosti rozdílu je o velikosti 0,001 prodloužení. Při bilineárním průběhu křivky je počáteční bod měření zachován dle doporučení, pouze je zvýšena velikost rozdílu na 0,005 mezi prodlouženími. [29]



Obrázek 2.21: Speciální krajní případy zatížení kompozitů [29]

Po provedení měření je nutné provést výpočet chyby měření. Minimální počet kusů pro vyhodnocení měření je dle normy stanoven na 5.

- Průměrná hodnota měření

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (6)$$

- Směrodatná odchylka

$$s_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \cdot \bar{x}^2 \right) / (n - 1)} \quad (7)$$

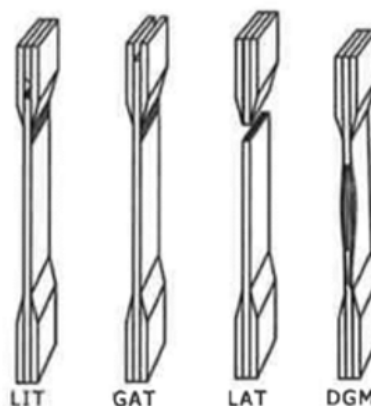
- Procentuální chyba měření

$$CV = 100 \cdot s_{n-1} / \bar{x} \quad (8)$$

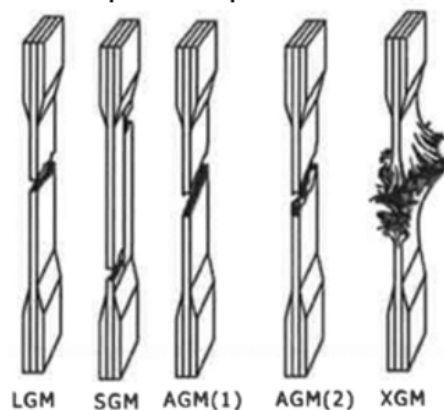
Po provedení měření je nutné zaznamenat kód přetržení. Ten se skládá ze tří písmen popisující typ, oblast a umístění porušení (viz. obr. 2.22).

První písmeno	
Typ porušení	Znak
Pod úhlem	A
Delaminace na kraji	D
Příložka	G
Boční	L
Více typů	M(xyz)
Podélné	S
Explosivní	X
Ostatní	O
Druhé písmeno	
Oblast porušení	Znak
V čelistech/příložkách	I
U čelistí/příložek	A
<1 W od čelistí/příložek	W
Oblast extenzometru	G
Více oblastí	M
Různé	V
Neznámé	U
Třetí písmeno	
Pozice porušení	Znak
Dole	B
Nahoře	T
Vpravo	L
Vlevo	R
Ve středu	M
Různé	V
Neznámé	U

Špatné přetržení



Správné přetržení



Obrázek 2.22: Vyhodnocení typů přetržení [29]

2.4 Teoretické výpočty

Tato část obsahuje popis a rovnice k určení složení kompozitu v místě jeho vady a k výpočtu teoretického modulu pružnosti v tahu pro kompozit bez vad.

2.4.1 Výpočet poměrů složení kompozitu

Složení kompozitů bylo určeno ze známého počtu vrstev kompozitu, hmotnosti skelné tkaniny, hustoty matrice, rozměrů měřeného vzorku a hmotnosti vzorku. Dále je známo, že každý vzorek obsahuje stejné, neměnné množství skelné textilie. Celkový princip výpočtu spočívá ve výpočtu dílčích hmotností složek a následného určení poměru kdy zde vzniká třetí složka kompozitu známá pod označením dutina. Ta definuje velikost chybějící matrice v kompozitu oproti ideálnímu případu. Jednotky potřebné k výpočtu jsou obsaženy v tabulce 2.11 [21]

Tabulka 2.11: Tabulka popisu výpočetních hodnot

Název jednotky	Znak	Jednotka	Název jednotky	Znak	Jednotka
Hmotnost kompozitu	m_c	[g]	Objem	V	[mm ³]
Hmotnost vláken	m_f	[g]	Hustota kompozitu	ρ_c	[g/mm ³]
Hmotnost matrice	m_m	[g]	Hustota matrice	ρ_m	[g/mm ³]
Podíl matrice	V_m	[%]	Hustota vláken	ρ_f	[g/mm ³]
Podíl vláken	V_f	[%]	Podíl dutin	V_d	[%]

Pro výpočet složení kompozitu jsou používány tyto rovnice:

- Objemový součinitel vlákna v kompozitu je vždy stejný pro všechny vzorky.

$$V_f = \frac{m_f}{\rho_f \cdot W \cdot H \cdot L_0} \quad (9)$$

- Určení celkové hustoty kompozitu

$$\rho_c = \frac{m_c}{V} = \frac{m_c}{W \cdot H \cdot L_0} \quad (10)$$

- Určení hmotnosti matrice

$$m_m = m_c - m_f \quad (11)$$

- Určení poměrů v obsahu PUR v matrici

$$V_m = \frac{m_m}{W \cdot H \cdot L_0 \cdot \rho_m} \quad (12)$$

- Určení poměru obsahu dutin v matrici

$$V_d = 1 - V_m - V_f \quad (13)$$

2.4.2 Teoretický výpočet modulu pružnosti v tahu

Teoretický výpočet modulu pružnosti v tahu byl použit jako kombinace složení dvou jedno osově zatížených kompozitů s využitím směšovacího pravidla, což vycházelo ze zvolené skladby kompozitu, kdy dvě vrstvy jsou v 0° orientaci a zbylé dvě proti nim mají orientaci 90°. Tento výpočet se týká pouze kompozitu bez vad, jelikož dané rovnice počítají pouze s ideálním stavem. Je uvažováno, že napětí na vláknech je stejné jako v matrici. Jednotky používané při výpočtu jsou popsány v tabulce 2.12. [21]

Tabulka 2.12: Jednotky použité při výpočtu

Název jednotky	Symbol	Jednotka
Modul pružnosti v tahu kompozitu s 0° orientací	E_{cp}	[MPa]
Modul pružnosti v tahu kompozitu s 90° orientací	E_T	[MPa]
Celkový teoretický pružnosti v tahu kompozitu	E_c	[MPa]
Míra vyztužení kompozitu	ξ	[–]

Následné vzorce pro výpočet teoretického modulu pružnosti v tahu jsou:

- Určení podélného modulu pružnosti v tahu

$$E_{cp} = 0,5 \cdot (v_f \cdot E_f + v_m \cdot E_m) \quad (14)$$

- Určení příčného modulu pružnosti v tahu dle Halpin - Tsaiovy rovnice

$$\eta = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + \xi} \quad (15)$$

$$\frac{E_T}{E_m} \cdot 0,5 = \frac{1 + \xi \cdot \eta \cdot V_f}{1 - \eta \cdot V_f} \quad (16)$$

- Určení celkového modulu pružnosti v tahu

$$E_c = E_{cp} + E_T \quad (17)$$

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části je popsán postup tvorby zkušebních vzorků metodou HP-RTM a následná analýza jejich mechanických vlastností tahovou zkouškou dle normy ASTM D3039-D3039M-14.

3.1 Příprava a tvorba zkušebních vzorků:

Pro experiment byla zvolena orientace skelných vláken s konfigurací $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$. Tloušťka kompozitu po zasycení byla stanovena na 3,2 mm, jelikož při použití doporučené tloušťky 2 mm nebylo možné nasimulovat analyzované vady kompozitu v dostatečném rozsahu. Tímto krokem byl obsah vláken z ideálního poměru 53 % PUR matrice ku 47 % skelných vláken změněn na 72,5 % matrice a 27,7 % vláken. Celkové rozměry zkušebního vzorku byly určeny na 280x25x3,2 mm.

Pro větší přesnost měření bylo v prvním kroku analyzováno 10 zkušebních těles reprezentujících kompozitní výrobky bez vad. U všech ostatních vad bylo pro testy vybráno 5 nejvhodnějších zástupců tak, aby byly v rámci jednoho setu vzájemně komparativní (viz, tab. 3.1).

Tabulka 3.1: Počet zkušebních těles dle daných vad

Typ zkušebního tělesa	Počet měřených těles
Kompozit bez vad	10
Zestárnutí	5
Ice flowers	5
Červík	5
Velkoplošné poškození červíkem	5
Neprosycení	5

3.1.1. Předběžný výpočet trhací síly

Použitá norma ASTM D3039-D3039M-14 umožňuje predikovat teoretickou maximální pevnost kompozitního systému. Hlavním důvodem orientačního výpočtu potřebné síly je volba vhodného trhacího stroje (dostatečné citlivosti tenzometrické hlavy). Tabulka 3.2 obsahuje popis jednotek použitých při výpočtu. Ty byly zadány o velikosti: $W = 25\text{mm}$, $H = 3,2\text{mm}$, $v_f = 0,274$, $v_{ft} = 0,5$, $F_f^u = 1\,700\text{ MPa}$.

Tabulka 3.2: Vysvětlení neznámých veličin použitých při výpočtu

Název jednotky	Symbol	Jednotka	Název jednotky	Symbol	Jednotka
Teoretická tuhost kompozitu	$F_{1,c}^{t,u}$	[MPa]	Podíl vláken namáhaných v tahu	v_{ft}	[%]
Tuhost E-skla	F_f^u	[MPa]	Podíl vláken v kompozitu	v_f	[%]
Minimální síla nutná k přetržení	F_{min}	[N]			

- Předpokládaná minimální pevnost kompozitu v tahu

$$F_{1,c}^{t,u} = v_{ft} \cdot v_f \cdot F_f^u \quad (18)$$

$$F_{1,c}^{t,u} = 1\,700 \cdot 0,274 \cdot 0,5$$

$$F_{1,c}^{t,u} = \mathbf{232,9\,MPa}$$

- Minimální síla nutná k přetržení

$$F_{min} = F_{1,c}^{t,u} \cdot W \cdot H \quad (19)$$

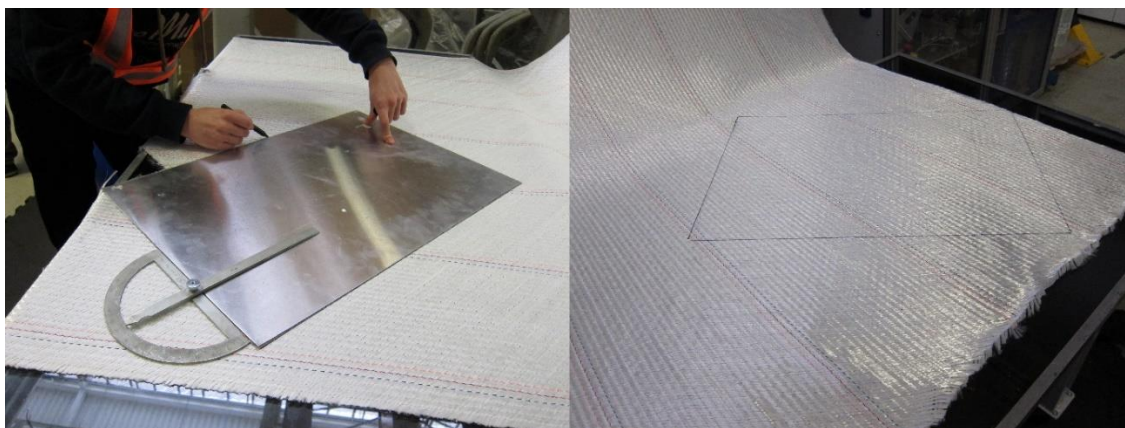
$$F_{min} = 246,5 \cdot 3,2 \cdot 25$$

$$F_{min} = \mathbf{18\,632\,N}$$

Tento odhad je pouze informativní. Dle normy je doporučováno uvažovat s trhací silou o několik procent vyšší, než je tento teoretický výpočet.

3.1.2 Výroba kompozitních desek se specifickými vadami

Jak již bylo zmíněno, výroba kompozitních desek o konfiguraci 0°/90°/90°/0° byla provedena metodou HP-RTM. První část kompozitu se skládala z dvouvrstvé výztuže v podobě textilie ze skelných vláken o konfiguraci 45°/-45° dodávaná výrobcem Dipex s označením KP 1200-2540mm. Popis nese informaci, že se jedná o skelná vlákna jednosměrného typu E o celkové plošné hustotě 1212 g/m²[příloha 8]. Před nařezáním byla textilie odmotána z dodané role na vhodnou délku. Dále na ni bylo nutné překreslit tvar desky s využitím pomocné kovové šablony o rozměrech 600 mm x 400 mm pod úhlem 45° (obr. 3.1 vlevo). Tento překreslený vzor (obr. 3.1 vpravo) byl následně vystříhán nůžkami na textil.



Obrázek 3.1: Překreslení vzoru na textilií (vlevo) a překreslený vzor kompozitní desky (vpravo)

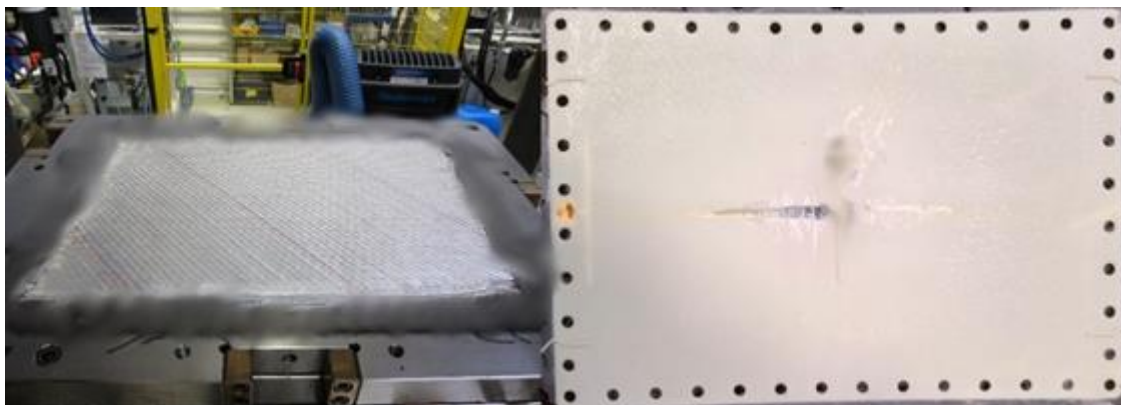
Jelikož je vyráběný kompozit složen ze čtyř vrstev bylo nutné na každou desku použít dva pláty vystřižené z textilie. Ty byly na sebe položeny tak, aby vytvořily žádanou konfiguraci kompozitu. Poté bylo z důvodu zaoblených rohů na vyráběné desce nutné zastříhnout rohy plátů ze skelných vláken (obr. 3.2 vlevo), aby nepřesahovaly přes tvarovou dutinu výrobního nástroje. V této fázi bylo rovněž při výrobě na jednu z desek připevněno těsnění, aby bylo zajištěno neprosycení vláken (obr. 3.2 vpravo) a tak simulována jedna z analyzovaných vad.



Obrázek 3.2: Připravený plát textilie se zastřiženými rohy (vlevo) a připevnění těsnění na textilií (vpravo)

Nastříhané pláty byly následně vloženy do formy (obr. 3.3 vlevo). K prosycení byla použita polyuretanová matrice od výrobce BASF s označením Elastolit® R 8819/104/LT. Ta se skládá ze dvou komponent, a to polyolu a isokyanátu. Ty jsou smíchány v mísící hlavě a následně pod vysokým tlakem vstříknuty do formy, ve které se nachází pláty textilie se skelnými vlákny. Celý proces spolu s vytvrzováním matrice trval několik minut. Jelikož je tvorba vad a jejich výskyt poměrně náhodný, bylo nutné pro měření

vytvořit značné množství desek (obr. 3.3 vpravo). Dále bylo požadováno, aby na měřeném vzorku byla vždy pouze jedna daná vada umístěna ideálně ve středu vzorku.



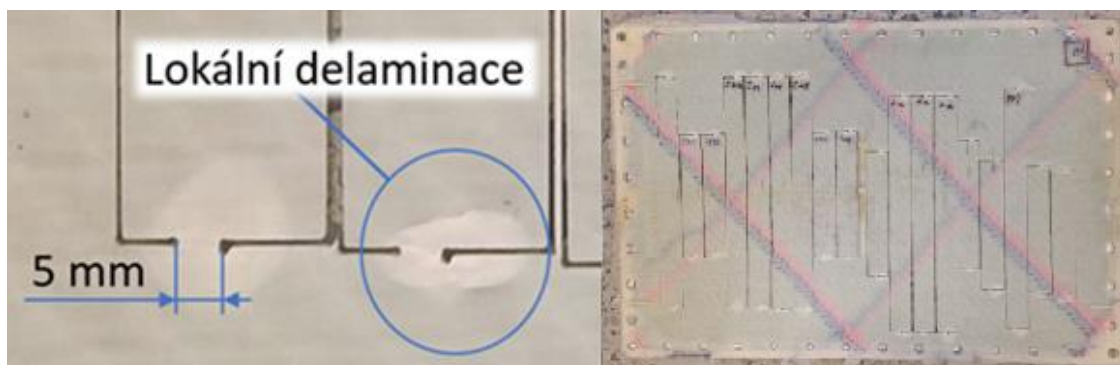
Obrázek 3.3: Vložené pláty textilie ve formě (vlevo) a nerovnoměrnost výskytu vad (vpravo)

3.1.3. Řezání desek na kompozitní vzorky

Výroba samostatných vzorků byla provedena řezáním za pomoci vodního paprsku. Ty byly vyřezány strojem PTV WJ3020 (obr. 3.4 vlevo) patřící společnosti BMTO GROUP. Řezání vodním paprskem eliminuje tepelné namáhání kompozitu, které by mohlo negativně ovlivnit mechanické chování kompozitu. Při této obráběcí technologii je však nutné vhodně stanovit počáteční bod řezu (v tomto případě v horní části vzorku, viz obr. 3.4 vpravo), protože při prvním proražení vodního paprsku skrze kompozit velmi často dochází k delaminaci (obr. 3.5 vlevo). Dimenzování desky však umožňovalo začít s řezem mimo obrysovou linii zkušebních vzorků, které tak nebyly touto delaminací ovlivněny. Vzorky nebyly zcela vyříznuty z vyrobené desky, aby nepropadaly do kádě s řeznou kapalinou, zůstaly spojeny s deskou prostřednictvím dvou můstků o šíři 5 mm (viz obr. 3.5 vlevo), které umožnily jejich následné vylomení.



Obrázek 3.4: Řezací stroj PTV WJ3020 (vlevo) a začátek řezu v horní části vzorku (vpravo)



Obrázek 3.5: Lokální delaminace kompozitu (vlevo) a vyřezaná deska vodním paprskem (vpravo)

3.2 Měření vzorků na tahové zatížení dle normy ASTM D3039-D3039M-14

V této části je popsána příprava vzorku před samotným měřením spolu s dokumentací tvaru měřených vad a vstupních parametrů použitých pro měření.

3.2.1. Příprava vzorků před měřením

Po dodání nařezaných desek (obr. 3.5 vpravo) bylo zapotřebí vylámat vzorky z desek a přiřadit je do jednotlivých analyzovaných skupin. Na základě dosavadních zkušeností s upínáním kompozitních materiálů do čelistí trhacího stroje byla upínaná část vzorku opatřena smirkovým papírem (viz. obr. 3.6), jelikož byl povrch testovaného kompozitu velice hladký a touto úpravou byl eliminován prokluz vzorku v čelistech (viz. obr. 3.7) bez nutnosti nepřiměřeného navyšování svěrné síly.



Obrázek 3.6: Smirkový papír



Obrázek 3.7: Kompletní vzorek připravený před měřením

3.2.2. Měření tahové zkoušky

Přehled analyzovaných vzorků s jednotlivými vadami je znázorněn na obrázcích 3.8 až 3.9. Obrázek 3.8 (vlevo) ukazuje vzorek bez vad. Na obr. 3.8 (uprostřed) je vzorek, který prošel tepelným zatížením dle normy VW PV1200 z důvodu simulace jeho zestárnutí. Tato norma definuje cyklické tepelné zatížení, při kterém je měněna teplota v rozmezí -40 °C až +80 °C po dobu 100 cyklů. Na obrázku 3.8 (vpravo) je vidět vada s ice flowers. Dále na obrázku 3.9 (vlevo) je zachyceno poškození červíkem a na obr. 3.9 (uprostřed) velkoplošné poškození červíkem. Jako poslední byl zkoušen vzorek s neprosycením obr. 3.9 (vpravo).



Obrázek 3.8: Kompozit bez vad (vlevo), zestárnutí (uprostřed), ice flowers (vpravo)

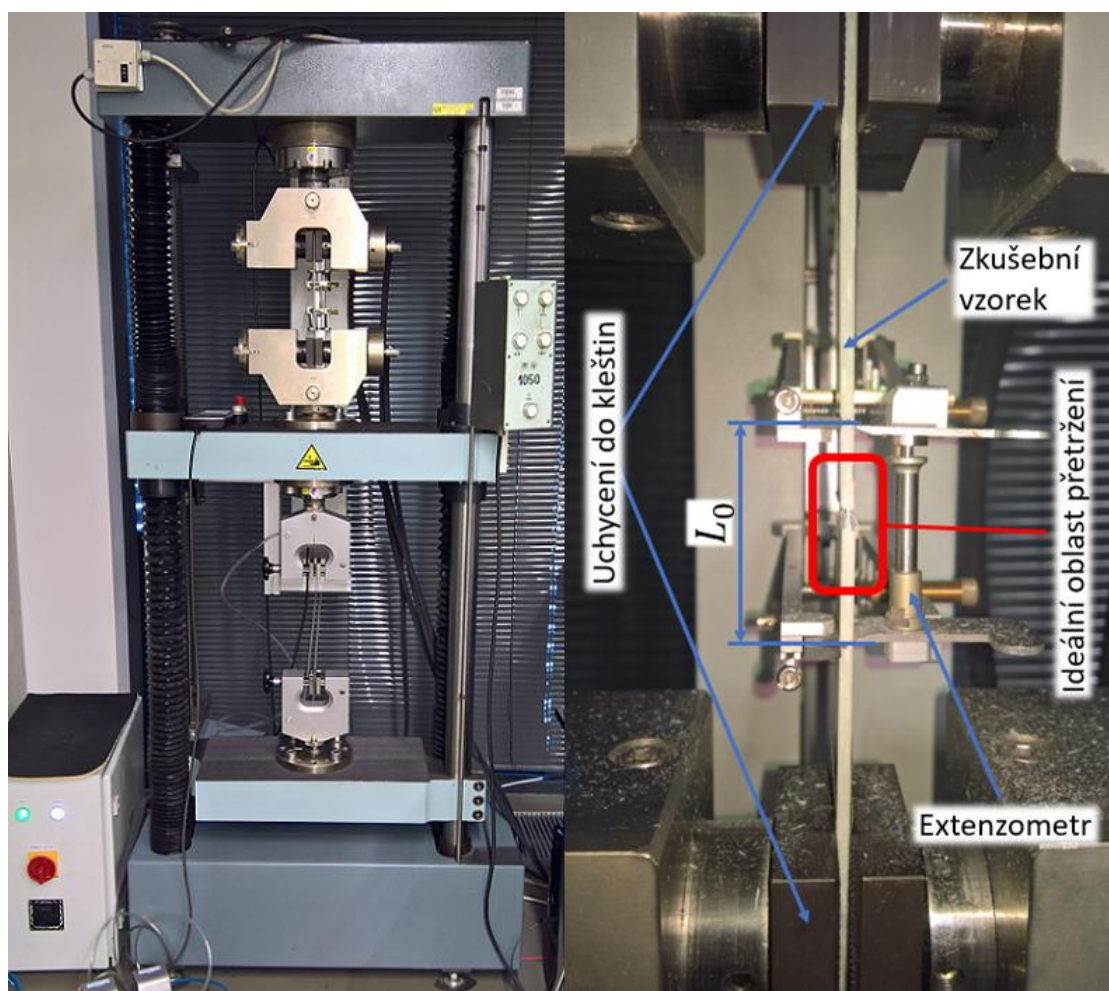


Obrázek 3.9: Červík (vlevo), velkoplošný červík (uprostřed), neprosycení (vpravo)

Samotné měření probíhalo v prostorech TUL v budově G. K měření bylo použito trhací zařízení TIRatest 2300 (obr. 3.10 vlevo) s tenzometrem do 100 kN a průtahoměrem (extenzometr) MFN–A. Veškeré hodnoty generované trhacím zařízením a průtahoměrem byly zaznamenány pomocí software LabNet. Veškeré parametry trhání byly definovány dle tab. 3.3. Měřený vzorek byl nejprve umístěn do středu hydraulických kleštín tak, aby byl v ose tenzometrického snímače. Následně byl extenzometr připevněn k měřenému vzorku do jeho středu (viz. obr. 3.10 vpravo). Samotné trhání vzorku se pohybovalo v rozmezí tří až čtyř minut.

Tabulka 3.3: Výchozí parametry nastavené při trhání

Parametr nastavení	Symbol	Velikost	Parametr nastavení	Symbol	Velikost
Rychlost trhání	v	2 mm/min	Výška vzorku	H	3,2mm
Rozteč extenzometru	L_0	50 mm	Délka upínacích čelistí	L_c	60 mm
Šířka vzorku	W	25 mm	Délka vzorku	L_v	280 mm



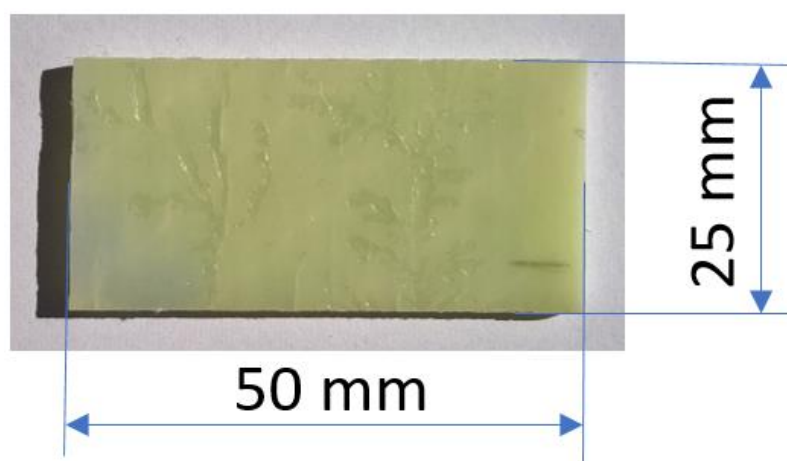
Obrázek 3.10: Trhací zařízení TIRatest 2300 (vlevo) a popis správného upevnění vzorku (vpravo)

3.2.3. Měření velikosti zasycení kompozitu

Z důvodu nutnosti zjištění velikosti chybějícího objemu PUR matrice bylo nutné zvážít oblast lokálního poškození. Za tu byla považována oblast měření extenzometru o velikosti $L_0=50$ mm. Tato oblast byla odřezána za pomoci pásové pily PROMA PK – 115 U (obr. 3.11 vlevo). Řezány byly vždy dva kusy od každé vady. Následně byly tyto vzorky (viz. obr. 3.12) samostatně zváženy na váze AND GF– 300 (obr. 3.11 vpravo).



Obrázek 3.11: Pásová pila PROMA PK-115 (vlevo) a váha AND GF– 300 (vpravo)



Obrázek 3.12: Rozměry odebraného vzorku určeného ke zvážení

4. VÝSLEDKY TAHOVÉ ZKOUŠKY

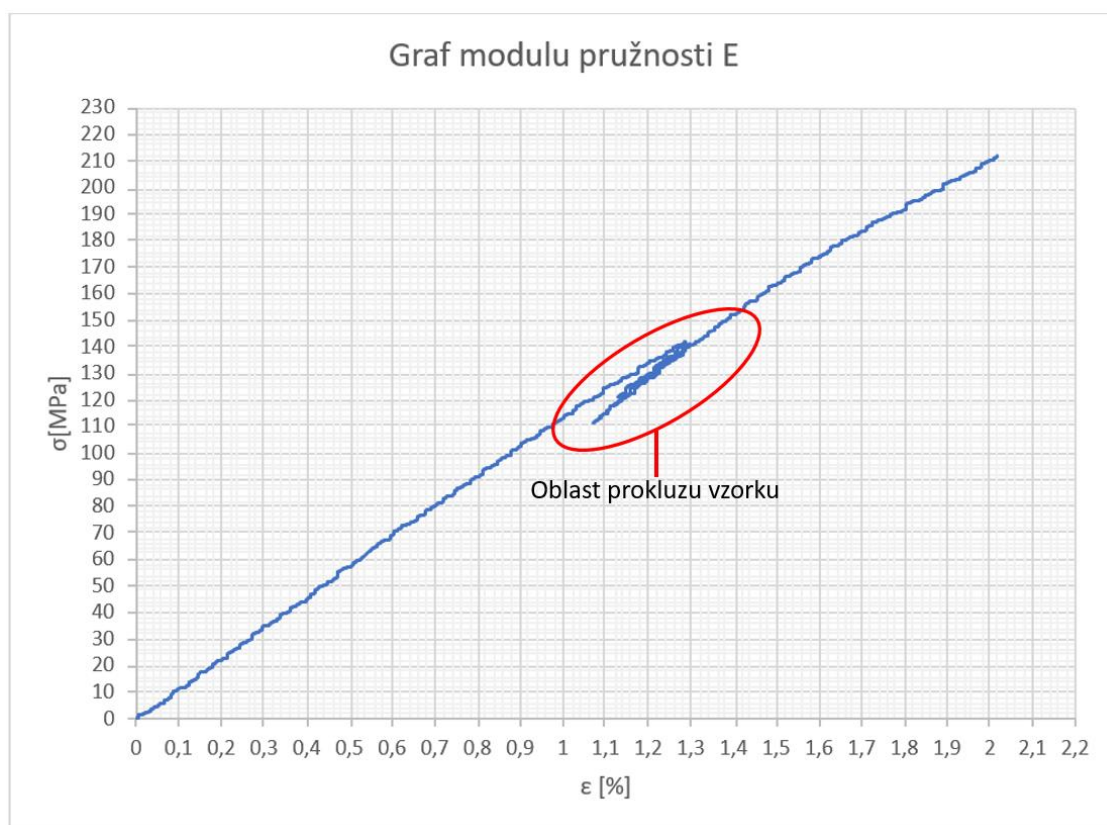
Tato část obsahuje výsledné změřené hodnoty spolu s grafy. Dále jsou zde výpočty objemových poměrů a teoretický výpočet modulu pružnosti v tahu vzorku bez vad.

4.1. Výsledné naměřené hodnoty napětí a prodloužení

Tato část obsahuje naměřená data a významné poznatky z měření.

4.1.1 Naměřené hodnoty vzorků bez vad

První měřený vzorek byl vyřazen z důvodu malé svěrné síly v kleštinách, což zapříčinilo neakceptovatelné prokluzování vzorku během testu (obr. 4.1). Další výsledky zkoušky již nebyly negativně ovlivněny, viz tab. 4.1. Vzorek po deformaci je zachycen na obr. 4.2.



Obrázek 4.1: Graf: Průběhu modulu pružnost v tahu u prokluzujícího vzorku



Obrázek 4.2: Typické přetržení vzorku bez vad

Tabulka 4.1: Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro kompozit bez vady

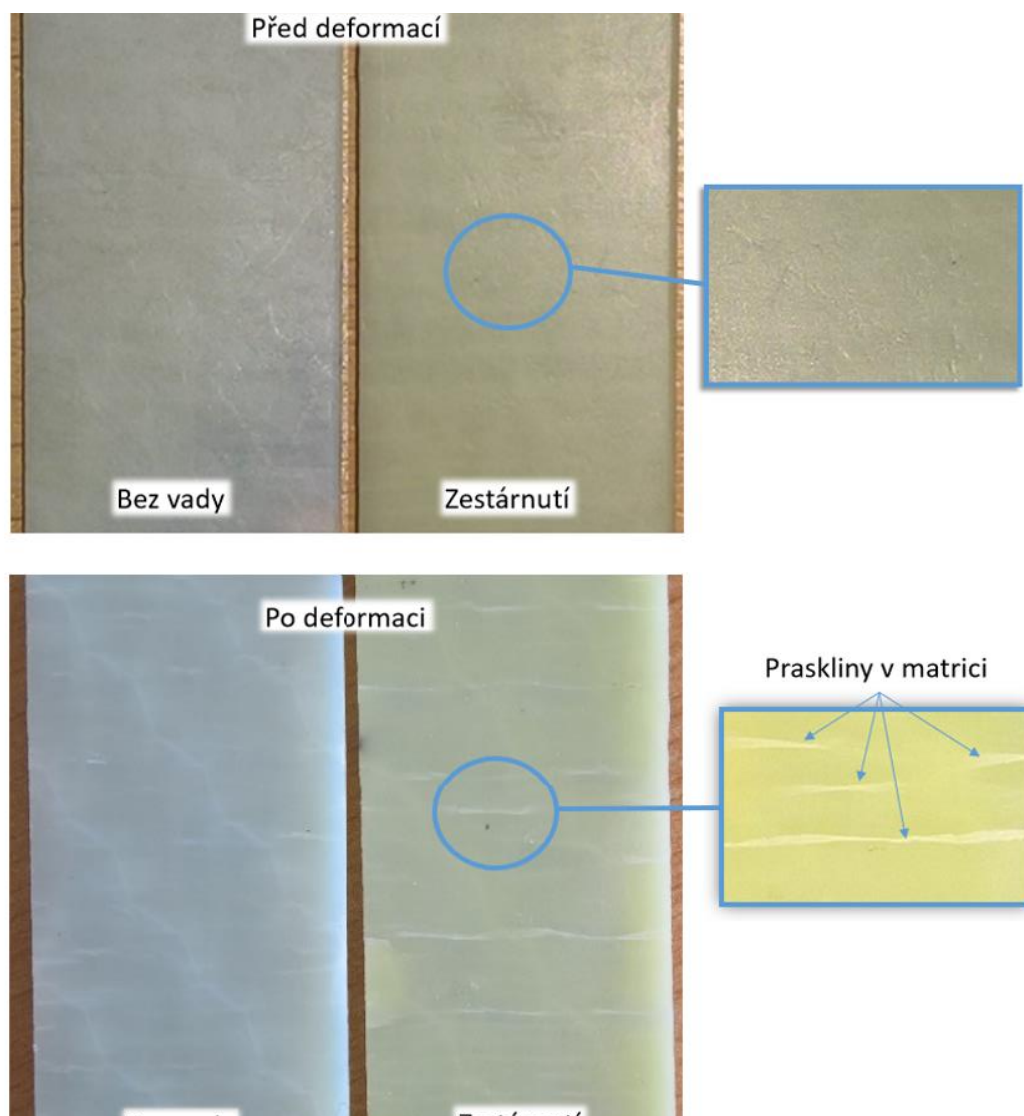
Číslo vzorku	σ [Mpa]	ϵ [%]	F [N]	E [MPa]	Typ přetržení
2	208,39	1,76	16 671,10	13 880,08	LGT
3	233,78	2,23	18 702,60	13 501,76	AGT
4	218,35	1,95	17 468,00	12 622,43	LWT
5	222,64	2,03	17 811,00	14 039,82	LGT
6	233,61	2,07	18 688,90	13 781,07	LGM
7	246,99	2,29	19 759,00	12 723,22	LGM
8	230,51	2,32	18 440,80	13 054,25	LGT
9	249,76	2,25	19 980,50	12 647,03	LGM
10	223,88	2,03	17 910,40	13 306,44	LGM
\bar{x}	229,77	2,10	18 381,37	13 284,01	
s_{n-1}	13,23	0,18	1 058,46	551,39	
CV [%]	5,76	8,75	5,76	4,15	

4.1.2 Naměřené hodnoty pro vadu zestárnutí kompozitu

Na grafu (příloha č. 2) lze pozorovat přerušovaný růst poměrně lineární křivky s odskoky. Ty jsou pravděpodobně zapříčiněny vznikem prasklin zkřehlé PUR matrice (obr. 4.4). Tento jev není pozorován při zatěžování kompozitu bez vad a je jednou z průvodních známek zvýšené křehkosti matrice způsobené zestárnutím matrice. Typická deformace vzorku je zachycena na obr. 4.3. Dosažené výsledky jsou přehledně znázorněny v tabulce 4.2.



Obrázek 4.3: Typické přetržení pro vzorek se zestárlym kompozitem



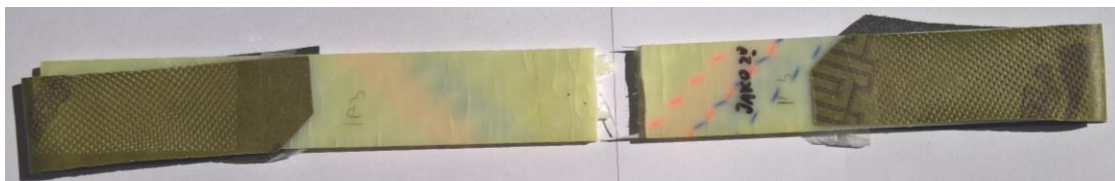
Obrázek 4.4: Porovnání kompozitu bez vad a zestárnutí před a po zkoušení

Tabulka 4.2: Tabulka naměřených hodnot pro zestárlé vzorky

Číslo vzorku	σ [Mpa]	ϵ [%]	F [N]	E [MPa]	Typ přetržení
1	217,78	1,97	17 422,60	12 641,46	LGM
2	187,81	1,76	15 024,70	12 337,80	LGT
3	197,96	2,12	15 836,40	11 800,29	LGM
4	191,62	1,68	15 329,70	13 684,29	LGT
5	205,92	1,92	16 473,90	124 25,45	LGT
\bar{x}	200,22	1,89	16 017,46	12 577,86	
s_{n-1}	9,06	0,13	724,48	522,86	
CV [%]	4,52	6,86	4,52	4,16	

4.1.3 Naměřené hodnoty vady s Ice flowers

U tohoto měření (obr. 4.5 a 4.6) bylo specifické přetržení vzorku mimo vadu kompozitu (obr. 4.6). Z tohoto výsledku lze usuzovat, že vada kompozitu s Ice flowers nemá žádný vliv na jeho pevnost, viz tab. 4.3.



Obrázek 4.5: Typické porušení vzorku vadou Ice flowers



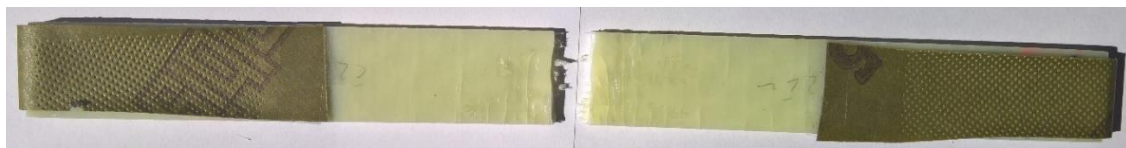
Obrázek 4.6: Detail přerušení vzorku mimo vadu kompozitu

Tabulka 4.3: Naměřené hodnoty pro vadu Ice flowers

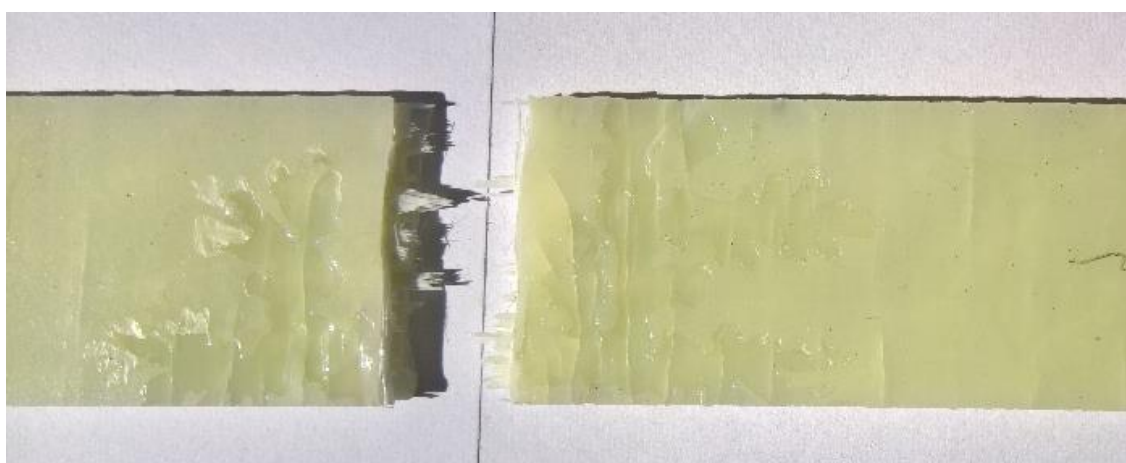
Číslo vzorku	σ [Mpa]	ϵ [%]	F [N]	E [MPa]	Typ přetržení
1	215,66	1,97	17 253,00	10 809,85	LGM
2	230,18	2,03	18 414,30	13 078,97	LWT
3	250,66	2,35	20 052,90	12 289,68	LGM
4	247,79	2,29	19 823,60	12 999,81	LGM
5	224,78	2,01	17 982,30	13 189,61	LGM
\bar{x}	233,82	2,13	18 705,22	12 473,59	
s_{n-1}	11,36	0,13	908,94	751,94	
CV [%]	4,86	6,25	4,86	6,03	

4.1.4 Naměřené hodnoty vady s červíky

Toto poškození (obr. 4.7 a 4.8) na rozdíl od Ice flowers již ukazuje, že lokální snížení tloušťky PUR matrice s větší hloubkou defektu vytváří oblast se zdánlivě sníženou pevností. To se projevuje porušením vzorku v oblasti vady (obr. 4.8). Toto snížení pevnosti je ale nepostřehnutelné z hlediska celkové pevnosti kompozitu, viz tab. 4.4.



Obrázek 4.7: Typické přetržení vzorku s červíky



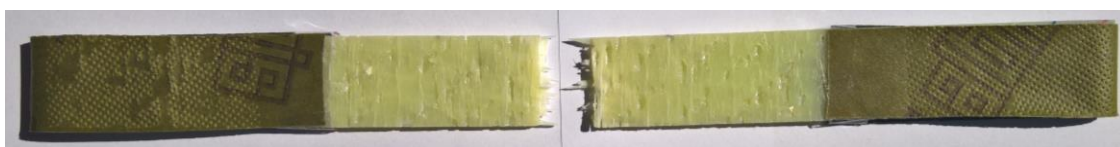
Obrázek 4.8: Porušení vzorku v místě vady

Tabulka 4.4: Naměřené hodnoty pro vadu kompozitu s červíky

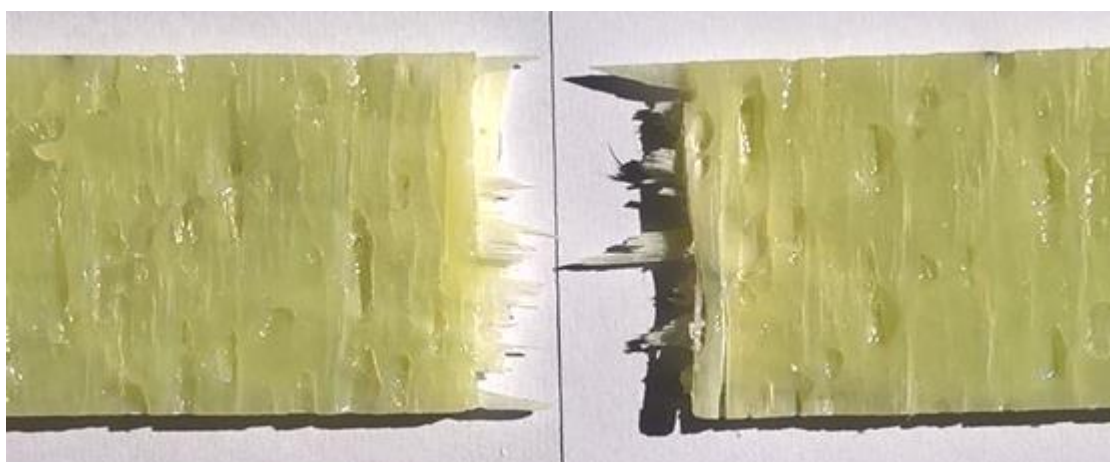
Číslo vzorku	σ [Mpa]	ϵ [%]	F [N]	E [MPa]	Typ přetržení
1	222,43	2,01	17 794,40	10 879,24	LWM
2	247,88	2,38	19 830,30	13 045,72	LGM
3	243,35	2,14	19 467,80	13 794,89	LGT
4	210,04	2,69	16 803,20	12 783,30	LGM
5	255,37	2,34	20 429,70	10 721,43	LGM
\bar{x}	235,81	2,31	18 865,08	12 244,92	
s_{n-1}	14,28	0,19	1 142,72	1 036,45	
CV [%]	6,06	8,39	6,06	8,46	

4.1.5 Naměřené hodnoty vady s velkoplošným poškozením červíky

U měření této vady lze pozorovat negativní vliv struktury vady na celkovou pevnost kompozitu. Poměrně hluboké propadliny (obr. 4.9 a 4.10) z obou stran kompozitu vytváří lokální ztenčení kompozitu. To vytváří oblasti až s částečně obnaženými vlákny, což snižuje schopnost přenášet maximální napětí. Obnažená vlákna jsou prosycena, tudíž není snížení modulu pružnosti v tahu výrazné, viz tab. 4.5. Vlákna jsou ukotvena v matrici kompozitu, a tudíž efektivně rozkládají napětí mezi sebou skrz matrici.



Obrázek 4.9: Typické přerušení vzorku pro velkoplošné poškození červíky



Obrázek 4.10: Detail porušení vzorku s velkoplošnými červíky

Tabulka 4.5: Naměřená data pro velkoplošné poškození červíky

Číslo vzorku	σ [Mpa]	ϵ [%]	F [N]	E [MPa]	Typ přetržení
1	212,09	2,14	16 967,30	12 079,12	LGM
2	212,09	2,14	16 967,30	11 456,50	LHT
3	181,33	1,64	14 506,50	12 047,88	LGM
4	218,49	2,19	17 479,50	11 543,80	LGM
5	218,11	2,16	17 448,60	12 546,28	LWT
\bar{x}	208,42	2,05	16 673,84	11 934,71	
s_{n-1}	11,69	0,18	934,95	335,77	
CV [%]	5,61	8,58	5,61	2,81	

4.1.6 Naměřené hodnoty vady neprosycení

U měření vzorku 1 neprosycení výztuže vyústilo ve shrnutí textilie (viz obr. 4.11), která se do optimální polohy vrátila až při zatížení přibližně 20-ti MPa. Celý tento jev lze pozorovat z průběhu grafu (příloha č. 6). Zde lze sledovat navýšení poměrného prodloužení bez nárůstu napětí na vzorku. Následný průběh je lineární a identický se zbylými měřeními. Posun vláken způsobil nerovnoměrné zatížení na vlákna, vlivem čehož nedošlo ke kompletnímu přetržení vzorku. Ostatní měření této vady skončila kompletním přetržením zkušební vzorku (viz obr. 4.12). Z důvodu nerovnoměrného zatížení vláken způsobeného neprosycením výztuže matricí dochází k předčasnému přetržení kompozitu, viz tab. 4.6. Nemožnost efektivně přenášet působící napětí z matrice na celou délku vlákna výrazně snižuje vyztužující potenciál kompozitu.



Obrázek 4.11: Vzorek se shrnutými skelnými vlákny



Obrázek 4.12: Typický vzorek po přetržení s vadou neprosycení

Tabulka 4.6: Naměřené hodnoty pro vadu neprosycení

Číslo vzorku	σ [Mpa]	ϵ [%]	F [N]	E [MPa]	Typ přetržení
1	132,24	2,70	10 579,40	5 611,72	LGM
2	159,36	2,27	12 748,50	6 187,043	LGM
3	162,78	2,16	13 022,50	5 023,17	LGM
4	152,15	2,24	12 171,70	5 247,44	LGM
5	165,70	2,14	13 256,20	5 573,76	LGM
Průměr (\bar{x})	154,45	2,30	12 355,66	5 528,62	
Směrodatná odchylka (s_{n-1})	10,13	0,17	810,55	333,17	
Velikost chyby (CV) [%]	6,56	7,49	6,56	6,03	

4.2. Stanovení složení analyzovaných kompozitů

Při stanovování složení kompozitů byly v tabulce zaznamenány hodnoty hmotností pro vzorky o rozměrech 50 mm x 25 mm x 3,2 mm. Pro stanovení objemu neprosycení byla provedena výjimka při měření hmotnosti, jelikož byla z důvodu specifické velikosti vady změřena pouze oblast s neprosycením o rozměrech 15 mm x 25 mm x 3,2 mm.

Tabulka 4.7: Naměřené hmotnosti výřezů zkušebních vzorků

Typ vzorku	Vzorek 1 [g]	Vzorek 2 [g]	Průměrná hmotnost [g]
Bez vad	6,221	6,233	6,227
Zestárnutí	6,218	6,230	6,224
Ice flower	6,212	6,217	6,215
Červík	6,002	6,014	6,008
Velkoplošný červík	5,226	5,270	5,248
Neprosycení (15x25x3,2)	1,177	1,204	1,191

Celkový výpočet byl určen dle vzorců uvedených v kapitole 2.4.1 Výpočet poměrů složení kompozitu. Je předpokládáno, že hmotnost skelných vláken je stejná ve všech vzorcích. Zvážením byla určena hmotnost vláken $m_f = 2,850g$. Pro zbylé výpočty je nutné znát hustotu skelného vlákna $\rho_f = 2\,550\,kg/m^3$ [21] a hustotu matrice $\rho_m = 1\,170\,kg/m^3$ [příloha č. 7].

$$V_f = \frac{2,850}{2\,550\,000 \cdot 0,025 \cdot 0,05 \cdot 0,0032}$$

$$V_f = 0,2794$$

Tabulka 4.8: Vypočtené hodnoty parametrů složení u měřených vzorků

Typ vzorku	$\rho_c [kg/m^3]$	$m_m [g]$	$m_f [g]$	$V_m [\%]$	$V_f [\%]$	$V_d [\%]$
Bez vad	1 556,750	3,377	2,850	72,17	27,34	0,49
Zestárnutí	1 556,000	3,374	2,850	72,10	27,34	0,56
Ice flower	1 553,625	3,365	2,850	71,90	27,34	0,76
Červík	1 502,000	3,158	2,850	67,49	27,34	5,17
Velkoplošný červík	1 312,000	2,398	2,850	51,25	27,34	21,41
Neprosycení (15x25x1,3)	839,338	0,336	0,855	7,17	27,34	65,49

4.4. Teoretický výpočet modulu pružnosti v tahu

Parametry nutné k výpočtu teoretického modulu pružnosti v tahu pro kompozit bez vad jsou: $v_m = 0,727$, $v_f = 0,273$ (určeny z tab. 4.8 pro hodnoty kompozitu bez vad), $E_f = 72\,000\text{ MPa}$ [21], $E_m = 2420\text{ MPa}$ [příloha č. 7] a $\xi = 2$ [21].

- Určení podélného modulu pružnosti v tahu

$$E_{cp} = 0,5 \cdot (0,273 \cdot 72\,400 + 0,727 \cdot 2\,420)$$

$$E_{cp} = 10\,779,07\text{ MPa}$$

- Určení míry vyztužení kompozitu

$$\eta = \frac{\left(\frac{72\,400}{2\,420}\right) - 1}{\left(\frac{72\,400}{2\,420}\right) + 2}$$
$$\eta = 0,906$$

- Halpin – Tsaiův vztah pro příčný modul pružnosti kompozitu v tahu

$$\frac{E_T}{2\,420} \cdot 0,5 = \frac{1 + 2 \cdot 0,906 \cdot 0,274}{1 - 0,906 \cdot 0,274}$$

$$E_T = 2\,405,68\text{ MPa}$$

- Určení celkového modulu pružnosti v tahu

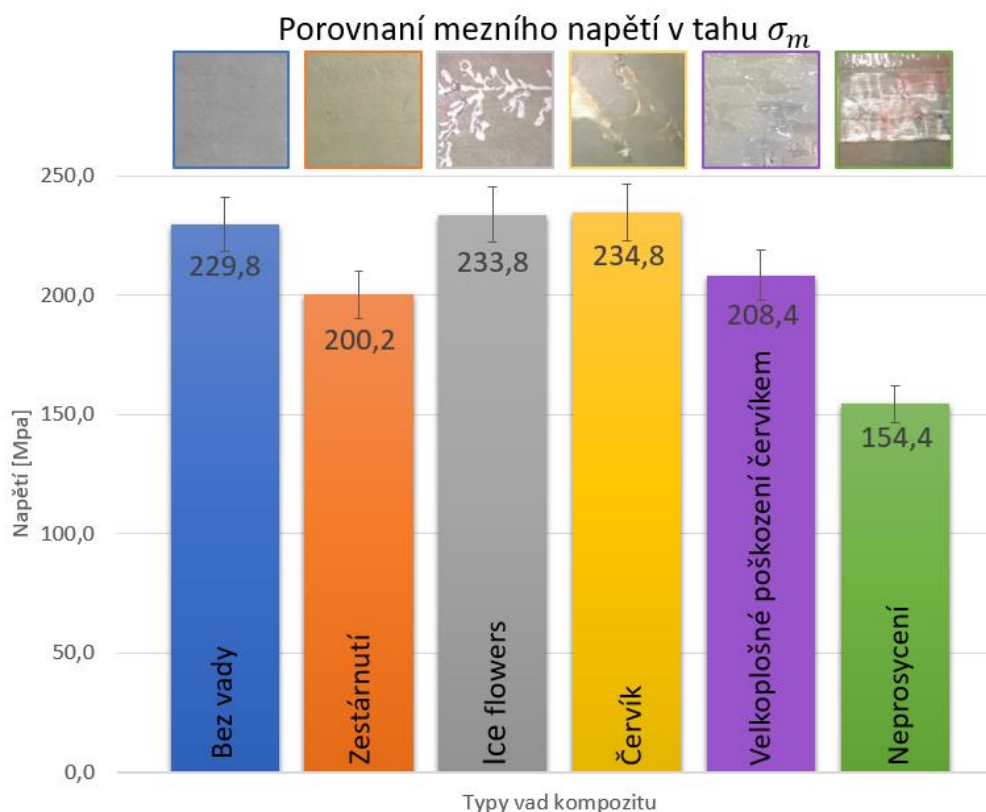
$$E_c = 10\,779,07 + 2\,405,68$$

$$E_c = 13\,184,75\text{ MPa}$$

Z výpočtu vychází modul pružnosti v tahu pro celkový kompozit o velikosti 13 184,75 MPa. Naměřený průměrný modul pružnosti v tahu u vzorku bez vad měl hodnotu 13 284,1 MPa. Porovnáním těchto dvou hodnot lze usoudit, že výchozí kompozit je opravdu kompozit bez vnitřních vad.

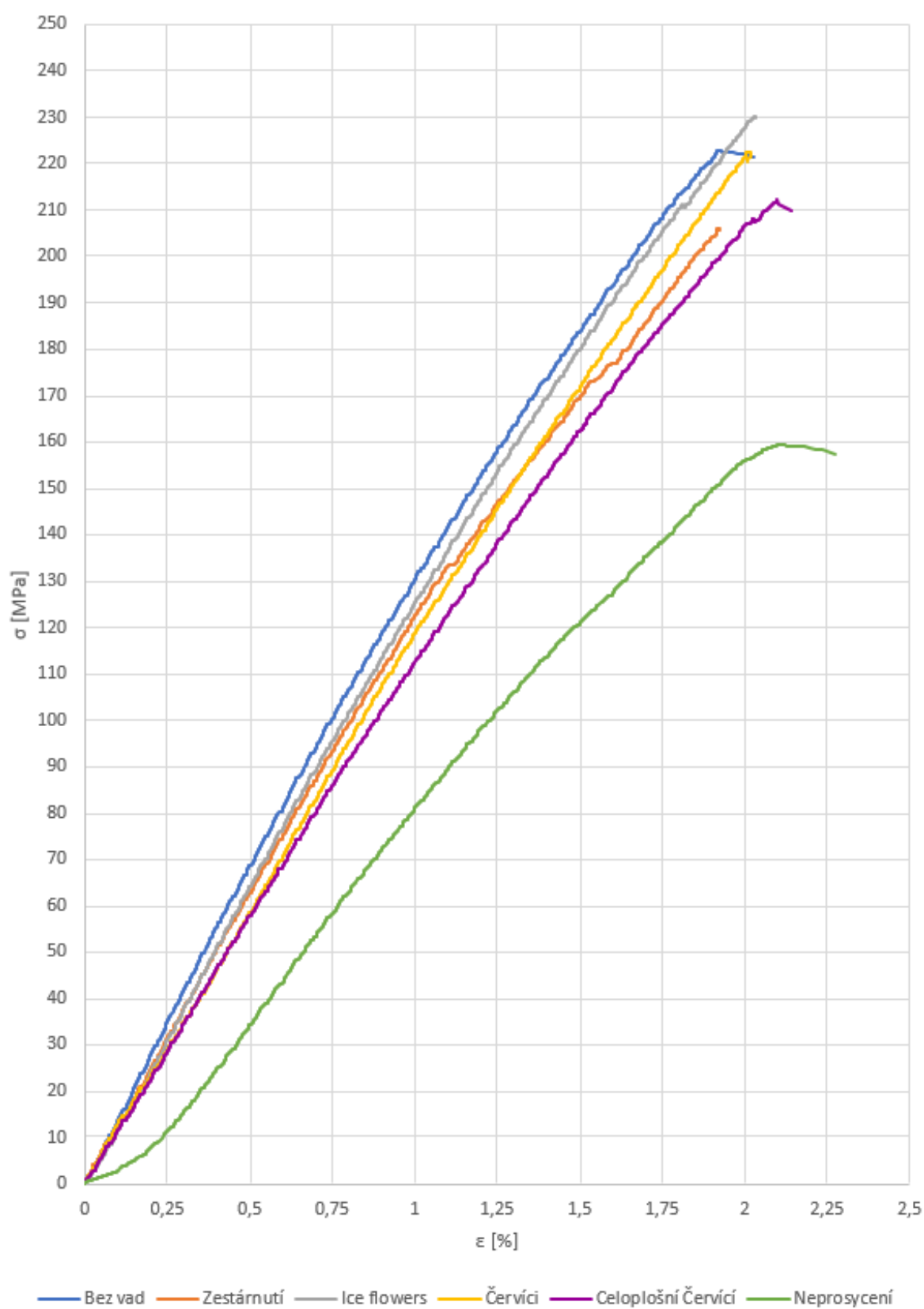
4.3. Porovnání vad

Při porovnání schopnosti přenést maximální napětí je zřejmé, (obr 4.13) že mezi kompozitem bez vad, s ice flowers, a s červíky není prakticky žádný rozdíl. Zde se jejich hodnota σ_m pohybuje na úrovni $232 \pm 2,5$ MPa. Tato nepřesnost je pravděpodobně zapříčiněna ručním vystřihováním plátů ze skelných vláken a jejich následným zakládáním do forem, což nepatří k nejpřesnějším způsobům výroby kompozitu. U velkoplošného poškození červíky vada proniká až k samotným vláknům, která mohou být i částečně obnažená, ale vždy prosycená. Takto zeslabený kompozit má o 13 % sníženou schopnost přenést vnější napětí. Dále je možné na obr 4.13 vidět snížení pevnosti zestárlého kompozitu. To je pravděpodobně zapříčiněno zkřehnutím PUR matrice, na jejímž povrchu bylo pozorováno mnohonásobně více prasklin než po zatížení ostatních analyzovaných vzorků. Samotné porušení matrice lze poměrně snadno vyčíst i z grafu na obr. 4.14. Neprosycený kompozit vykazoval ve všech analyzovaných aspektech nejhorší výsledky. Na grafu 4.14 lze velice snadno pozorovat kompletně posunutou křivku s velmi velkými deformacemi při nízkém zatížení, což je pravděpodobně zapříčiněno samovolnou orientací nefixovaných skelných vláken. Tato vada znemožňuje efektivní přenos napětí z povrchu kompozitu na výztuž.



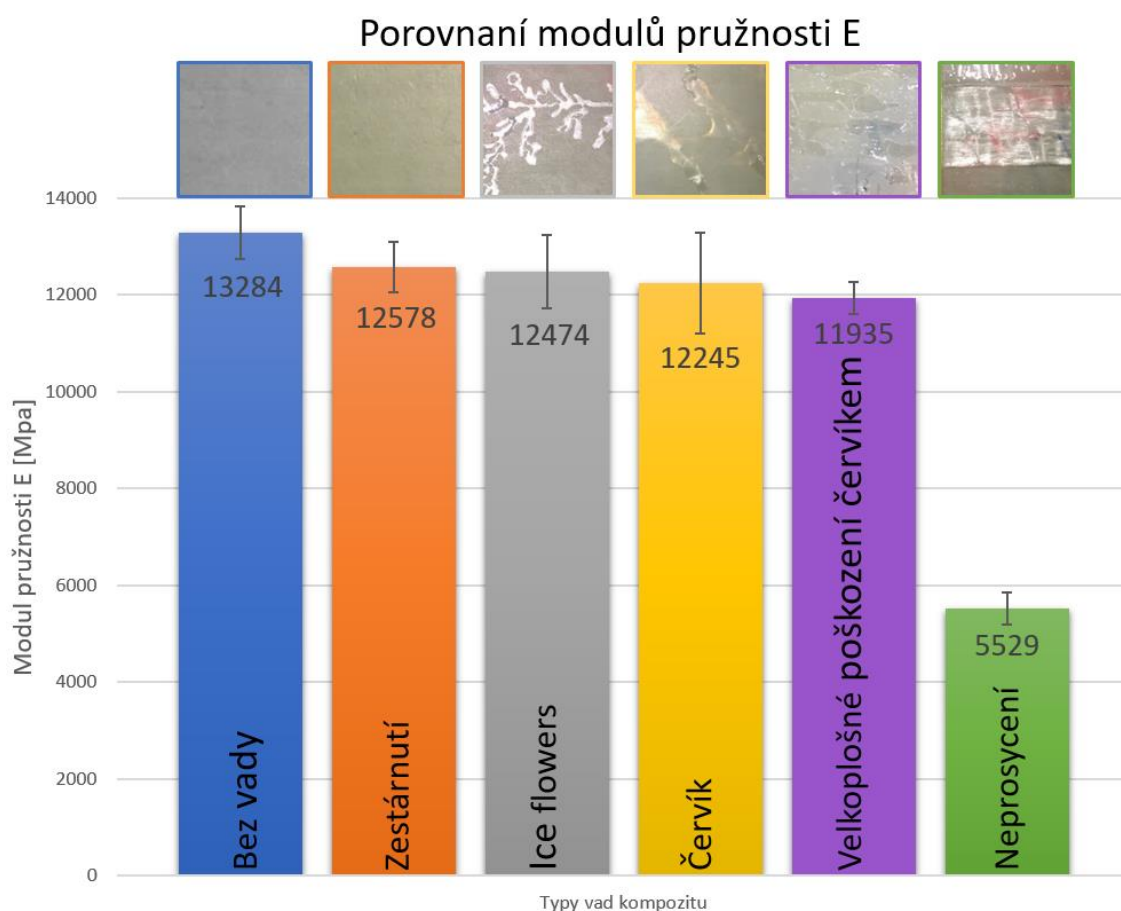
Obrázek 4.13: Porovnání kompozitu dle maximálního napětí

Graf napětí ku prodloužení pro reprezentanty daných vad



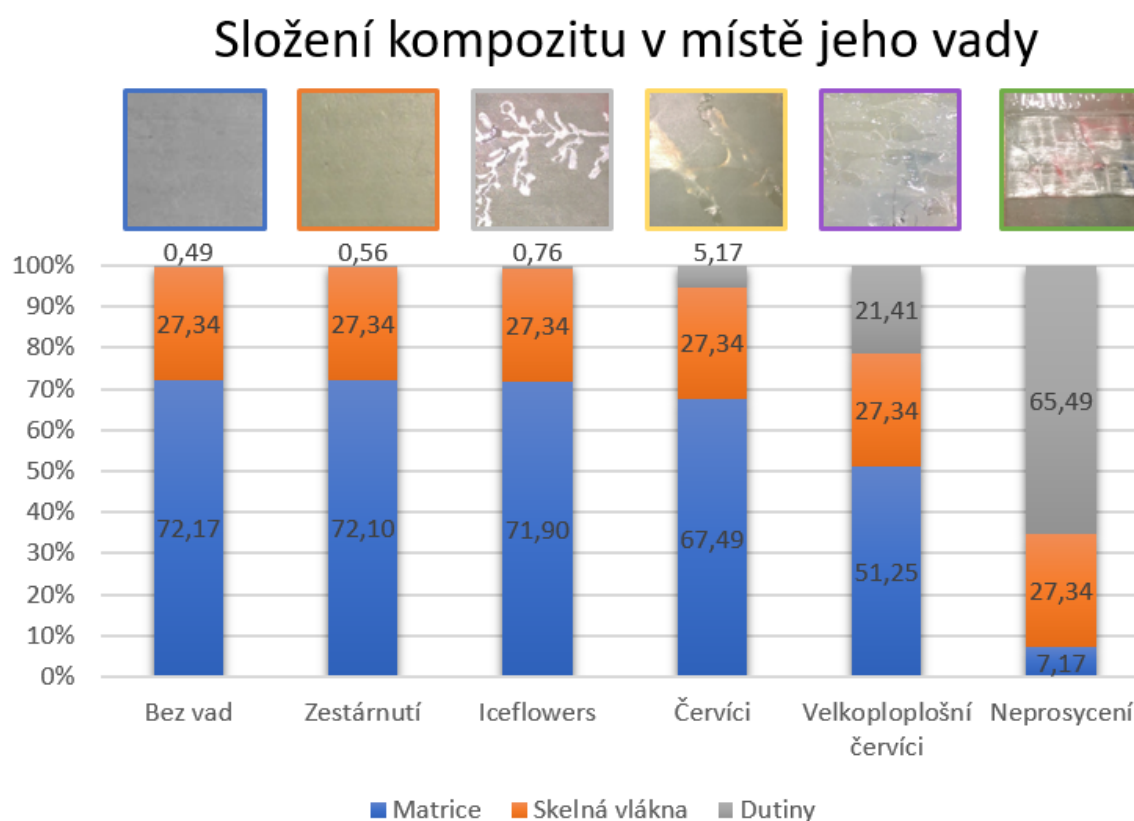
Obrázek 4.14: Souhrnný graf posuzující veškeré typy vad kompozitu mezi sebou

Dále byla porovnána hodnota vypočteného teoretického modulu pružnosti v tahu o velikosti 13 184 MPa s průměrnou naměřenou hodnotou modulu pružnosti v tahu pro kompozit bez vad, který dosáhl velikosti 13 284 MPa. Tyto výsledky jsou téměř totožné, čehož bylo dosaženo použitím stejné hodnoty hmotnosti skelných vláken jak ve vzorcích, tak i při teoretickém výpočtu. Tento parametr byl zjištěn spálením zkušebního vzorku a následným zvážením hmotnosti vláken. Zvolený postup byl velice důležitý, jelikož při ruční manipulaci došlo k drobnému roztažení skelné textilie o 5,55 %, což zapříčinilo nižší celkovou plošnou hmotnost, než je uvedena v materiálovém listu. Dále byl určen poměr skelných vláken v kompozitu na 27,5 %. Z obrázku 4.15 lze vyčíst, že na rozdíl od velikosti hodnot maximálního napětí má zestárlý kompozit prakticky stejný modul pružnosti v tahu jako ice flowers a červíci. Také je zřejmé že kompozit bez vad má přibližně o 10 % vyšší modul pružnosti v tahu než ostatní vzorky s drobnou vadou.



Obrázek 4.15: Porovnání kompozitu dle modulů pružnosti

Z výpočtu složení kompozitu v oblastech vad lze jednoduše potvrdit výsledky měření a teorie. Podle ní je kompozit do 1 % dutin považován za velmi dobře vyrobený. Množství 5 % dutin je hraniční. Do tohoto limitu nevykazuje kompozit významného poklesu mechanických vlastností. Na této hranici se pohybují i červíci a dle grafů je možné pozorovat, že pevnost a modul pružnosti v tahu kompozitu je opravdu pouze minimálně ovlivněn. U velkoplošných červíků a neprosycení lze vidět, že velikost chybějící matrice je poměrně velká. U poškození kompozitu neprosycením objem matrice dosahuje necelých 7 % celkového objemu. To vede k výraznému snížení modulu pružnosti v tahu. Vlákná mají tendenci se vlivem neprosycení trhat, jelikož není vytvořen efektivní přenos napětí mezi vlákny a maticí.



Obrázek 4.16: Přehled složení kompozitu v oblasti výskytu vad

5. ZÁVĚR

Cílem měření bylo porovnat vady kompozitu. Z tohoto důvodu byl proveden i teoretický výpočet modulu pružnosti v tahu pro kompozit bez vad, aby bylo ověřeno, že bylo dosaženo potenciálu analyzovaného kompozitu. Teoreticky měl kompozit dosáhnout hodnoty 13 184 MPa, naměřená velikost modulu pružnosti v tahu byla 13 284 MPa. Rozdíl výpočtu a naměřené hodnoty se liší pouze v 1 % z čehož lze usoudit, že kompozit bez vad byl vhodně vyroben a shoduje se s předpokládaným modulem pružnosti v tahu. Dále bylo provedeno měření mechanických vlastností vzorků při tahovém namáhání dle ASTM D3039-D3039M. Z výsledků lze usoudit, že kompozit bez vad spolu s kompozitem s Ice flowers a červíky dosahují stejných hodnot, a tudíž z pevnostního pohledu tyto vady neovlivňují kompozit. U velkoplošného poškození červíky a zestárnutí kompozitu je pozorovatelný 11 % pokles maximálního přeneseného napětí. Neprosycený kompozit je ze všech typů poškození kompozitů nejhorší, kdy za testovaných podmínek došlo k poklesu pevnosti o 34 %.

Z naměřených hodnot modulu pružnosti v tahu kompozitů lze snadno vyčíst, že veškeré vady až na neprosycení mají o 5 až 10 % nižší modul pružnosti v tahu, než má kompozit bez vad. Tyto rozdíly modulů pružnosti v tahu lze přisuzovat i nepřesné ruční výrobě kompozitu. Neprosycený kompozit má o 65 % nižší modul pružnosti v tahu.

Tyto výsledky souhlasí i s velikostmi dutin v kompozitu pro dané vady, kdy malé procento dutiny prakticky neovlivňuje parametry kompozitu.

Z výše uvedených výsledků lze tedy konstatovat, že při použití kompozitů v elastické oblasti lze bez problémů použít i kompozity obsahující vadu v podobě Ice flowers, červíků nebo zestárnutí. Velkoplošné poškození červíky je také použitelné, i když u této vady je už nutné vzít v úvahu až 10-ti % pokles tuhosti kompozitu. Jinak řečeno z hlediska mechanických vlastností (při zatěžování v tahu) nemají analyzované vady významný vliv na použitelnost, pokud vada nezapříčiňuje neprosycení vlákna maticí. Neprosycený kompozit měl všechny měřené vlastnosti redukovány o několik desítek procent a je nutné kompozit s touto vadou z funkčního hlediska označit za defektní.

Pro další výsledky měření by bylo vhodnější použít více vzorků skládajících se pouze z tkaniny o 0° orientaci. Při stříhání u ní totiž nedochází k tak velkému nechtěnému

roztážení textilie. Dále by bylo vhodné tyto vady podrobit i dalším zkušebním testům především tlaku a ohybu, aby vznikl ucelený přehled vlivu přítomnosti těchto vad na mechanické chování kompozitu i při jiných způsobech jeho zatěžování, kterými je zamýšlená konstrukce rovněž vystavována.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DUCHÁČEK, J. *POLYMERY výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. VŠCHT Praha (2. vydání, 2006), ISBN 80-7080-617-6 [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid_isbn-80-7080-617-6
- [2] KRATOCHVÍL, B. *Úvod do studia materiálů*. VŠCHT Praha (1. vydání, 2005), ISBN 978-80-7080-568-8 [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid_isbn-80-7080-568-4
- [3] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz; 2016, ISBN 978-80-88058-68-7 [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/01.html>
- [4] *Obrázky plastových dílů*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://eshop.skoda-auto.com/cz/cs/b2c>
- [5] *Polymery-úvod*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/4250185-Polymery-uvod-jan-merna-ustav-polymeru-vysoka-skola-chemicko-technologicka-v-praze-struktura-fazovy-stav-a-zakladni-vlastnosti-polymeru.html>
- [6] *Kompozitní materiály*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [7] *POLYMERY a KOMPOZITY*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/CI57/POLYMERYaKOMPOZITYprednáška%20CI57.ppt
- [8] *Výroba metodou HPRTM*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.katcon.com/advancedmaterials/hp-rtm-high-pressure-resin-transfer-molding/>
- [9] *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#013
- [10] *Historie kompozitů*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/historie.pdf>

- [11] *Obrázek CD obalu z PU.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: http://www.leicashop.cz/obal-box-na-cd-1cd-slim-ciry_d33145.html
- [12] *Obrázek odměrky z PP.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.gastro-harant.cz/katalog/112/odmerky/4938/odmerka-z-polypropylenu-prumer-14-5-cm/>
- [13] *Obrázek akustického molitanu.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.akustickematerialy.cz/produkt/rubicon/>
- [14] *Obrázek molitanu v autosedačce.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.autotuning.sk/tuning/teoriatechnika/calunenie-ii/>
- [15] *Obrázek montážní pěny.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://builddailys.com/cs/pages/1638837>
- [16] *TPE-Termoplastický elastomer.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/tpe.html>
- [17] *Obrázek automobilové pneumatiky.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/blog/polymers2plastics/analyzing-the-mastication-process-in-elastomer-processing/>
- [18] *Obrázek dílu z elastomeru.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.craftechind.com/top-5-elastomers-gasket-seal-applications/>
- [19] *Kompozitní materiály.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3099046/>
- [20] *Kompozitní materiály.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/16_Chemie-a-ekologie_43-44/44_MMP/072_Kompozitni-materialy---Rous--P1.pdf
- [21] AGARVAL, B. D. *Vláknové kompozity.* SNTL první vydání 1980, DT 531.8:677.488.004.12(075.8)
- [22] *Obrázek dílů z reaktoplastu.* [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.augon.com/pro/read.asp?id=146>

- [23] *Vlastnosti polypropylenu a polyethylenu*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: http://www.umela-trava.cz/download/cj-vlastnosti_polypropylenu_a%20polyethylenu.pdf
- [24] POLYOLEFINY. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/PE%20a%20PP2013.pdf>
- [25] VÁVRA, P. *Strojnické tabulky pro SPŠ strojnické*. SNTL PRAHA 1983, DT 621.7 (083.53)(075.3)
- [26] *Obrázek kompozitních dílů BMW i3*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: https://worldaccount.basf.com/wa/plasticsAP~en_GB/portal/show/common/plasticportal_news/2014/14_176
- [27] *Obrázek kompozitní součásti*. [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <http://compose-tools.com/fr/ri/concretisation/triangle-de-suspension-innovant-en-composites-thermoplastiques.html>
- [28] AUSPEGER, A. *Technologie zpracování plastu*. Code Creator, s.r.o.; distribuce publi.cz; 2016. ISBN 978-80-88058-77-9 [online]. [vid. 27. 6. 2017]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>
- [29] ASTM D3039/D3039M –14. *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*.

SEZNAM PŘÍLOH:

Příloha č. 1: Graf napětí ku prodloužení pro kompozit bez vad

Příloha č. 2: Graf napětí ku prodloužení pro zestárlý kompozit

Příloha č. 3: Graf napětí ku prodloužení pro kompozit s ice flowers

Příloha č. 4: Graf napětí ku prodloužení pro kompozit s červíky

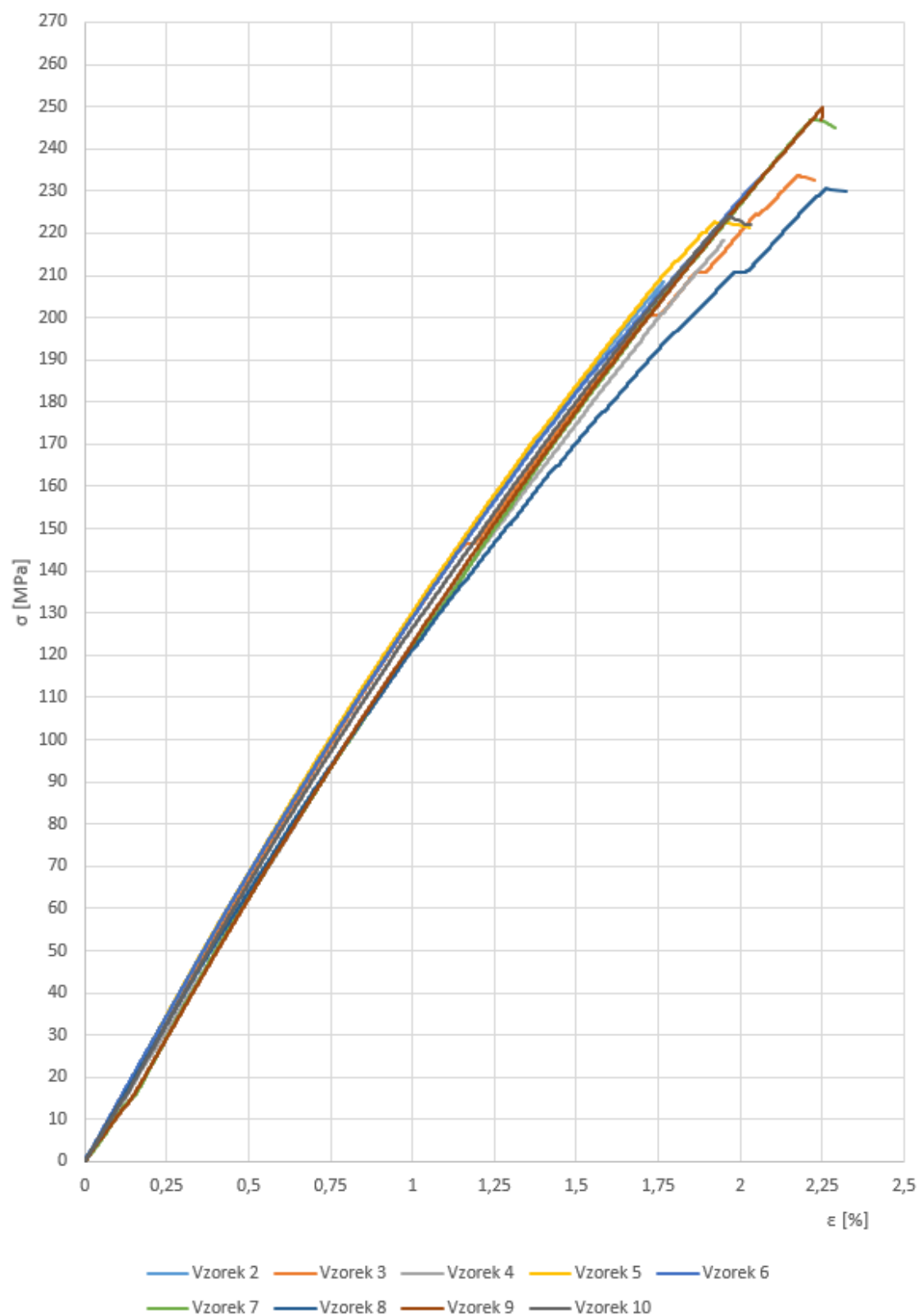
Příloha č. 5: Graf napětí ku prodloužení pro kompozit s velkoplošnými červíky

Příloha č. 6: Graf napětí ku prodloužení pro kompozit s neprosycením

Příloha č. 7: Materiálový list polyuretanové matrice

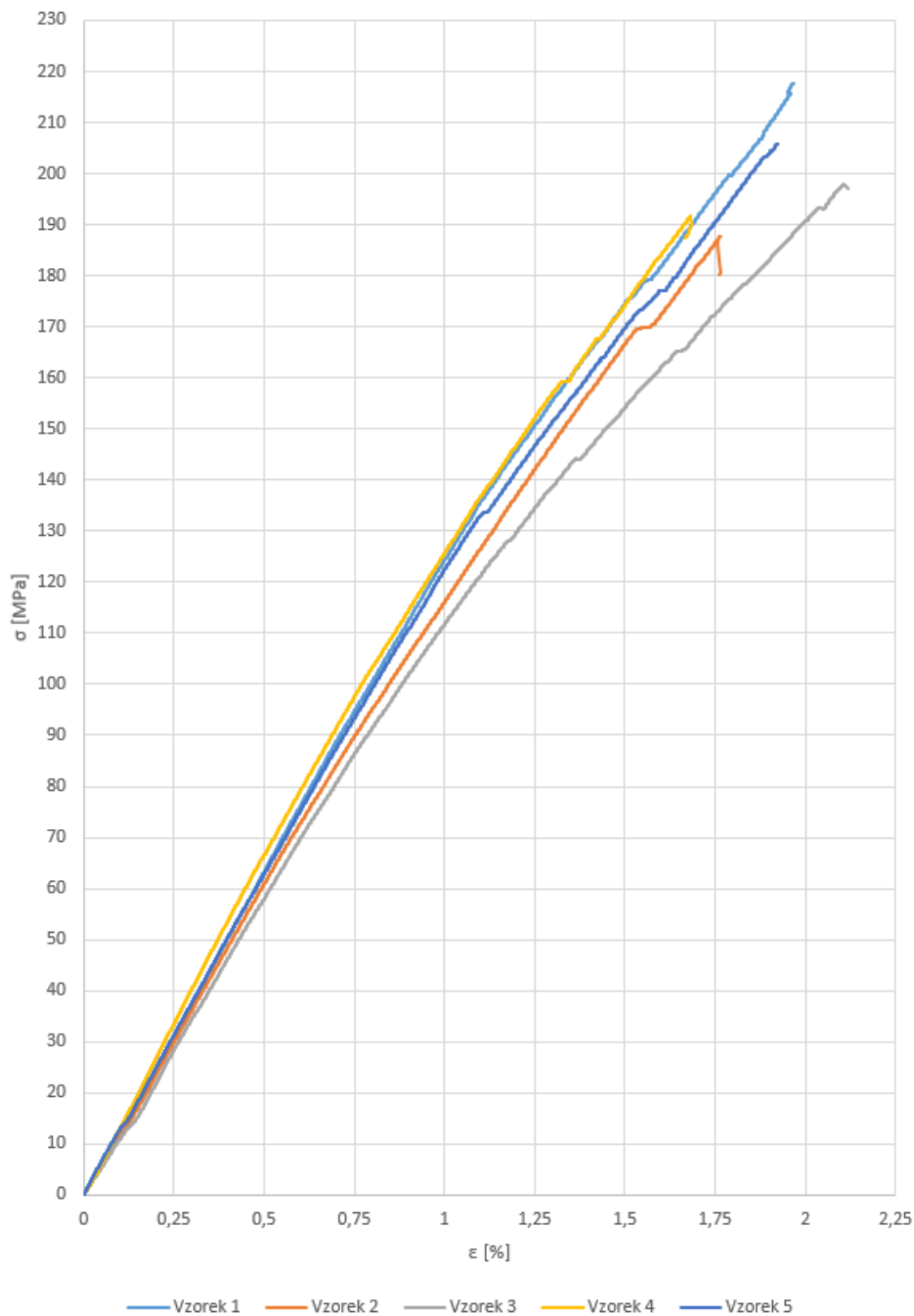
Příloha č. 8: Materiálový list skelné tkaniny

Graf napětí ku prodloužení pro kompozit bez vad



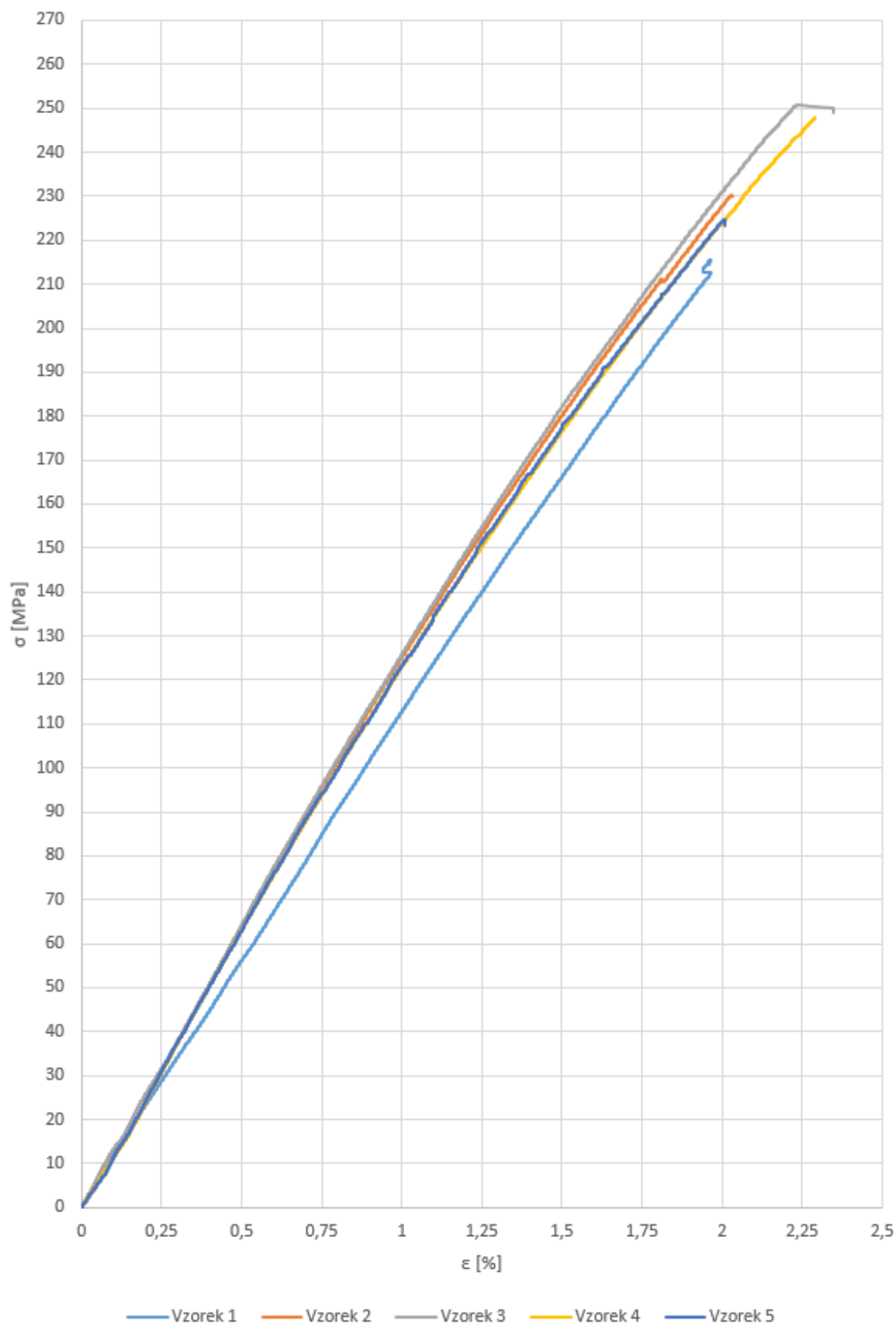
Obrázek 0.1: Graf napětí ku prodloužení pro kompozit bez vad

Graf napětí ku prodloužení pro zestárlý kompozit



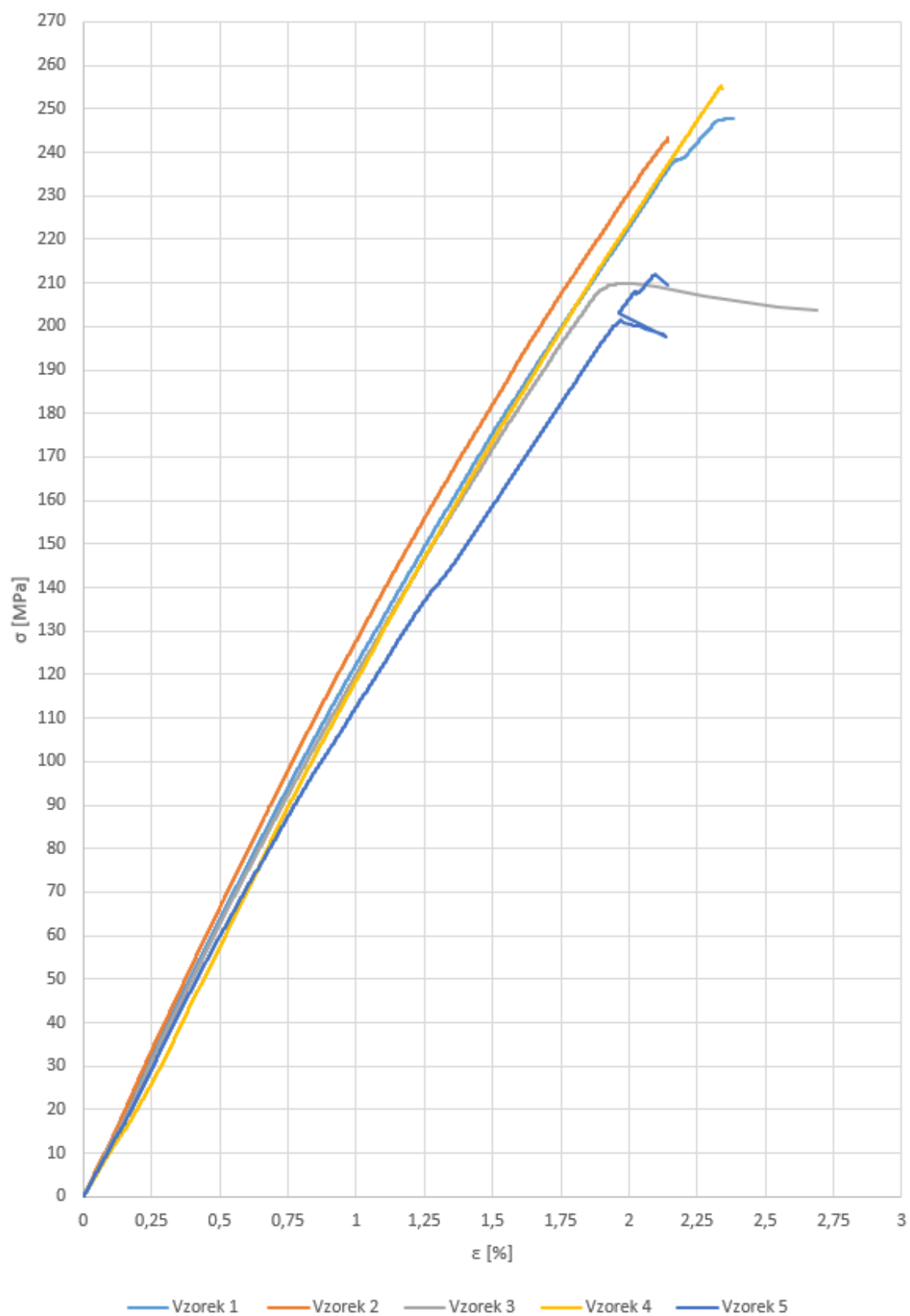
Obrázek 0.2: Graf napětí ku prodloužení pro zestárlý kompozit

Graf napětí ku prodloužení pro vadu kompozitu s Ice flowers



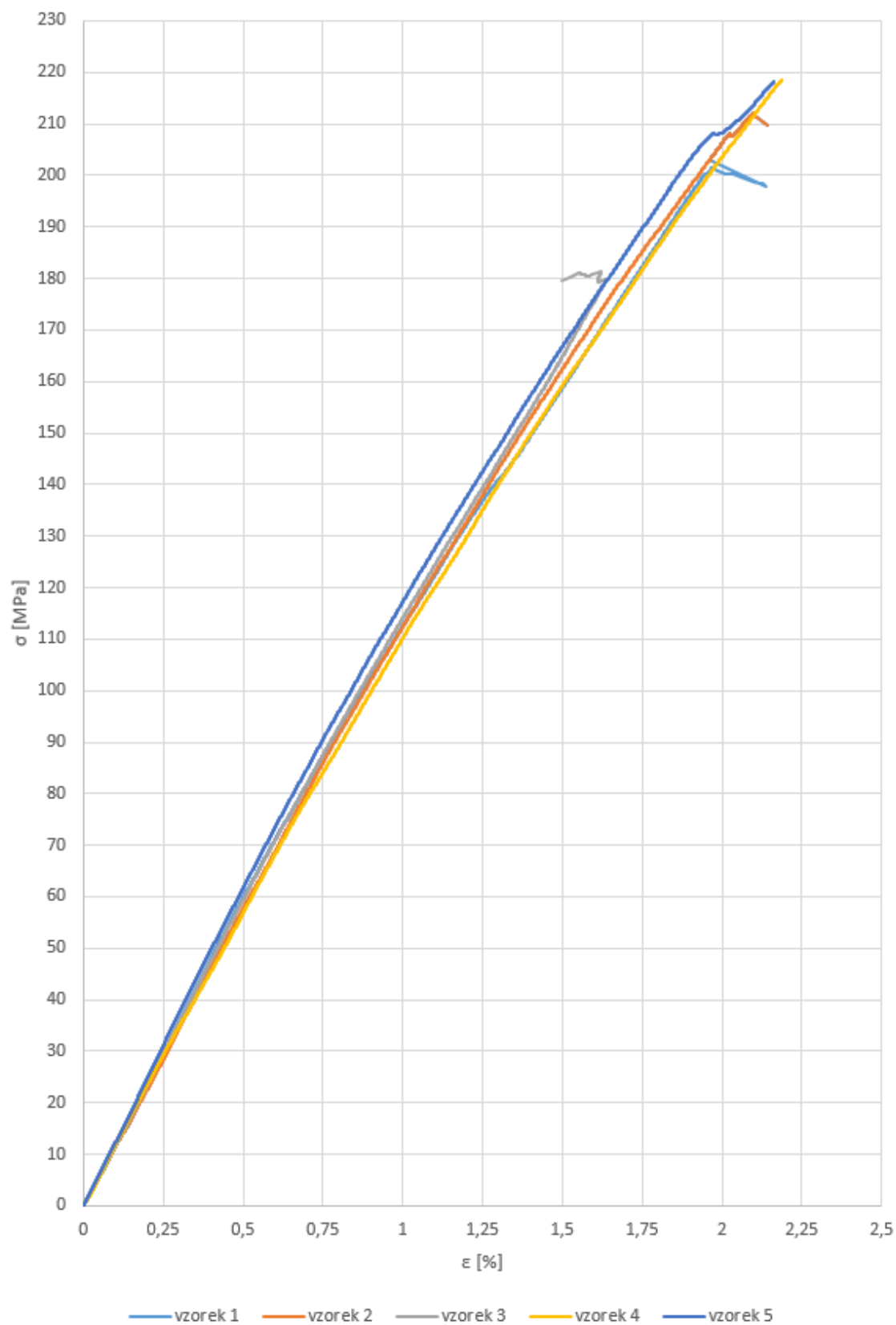
Obrázek 0.3: Graf napětí ku prodloužení pro vadu kompozitu s Ice flowers

Graf napětí ku prodloužení pro vadu kompozitu s červíkem



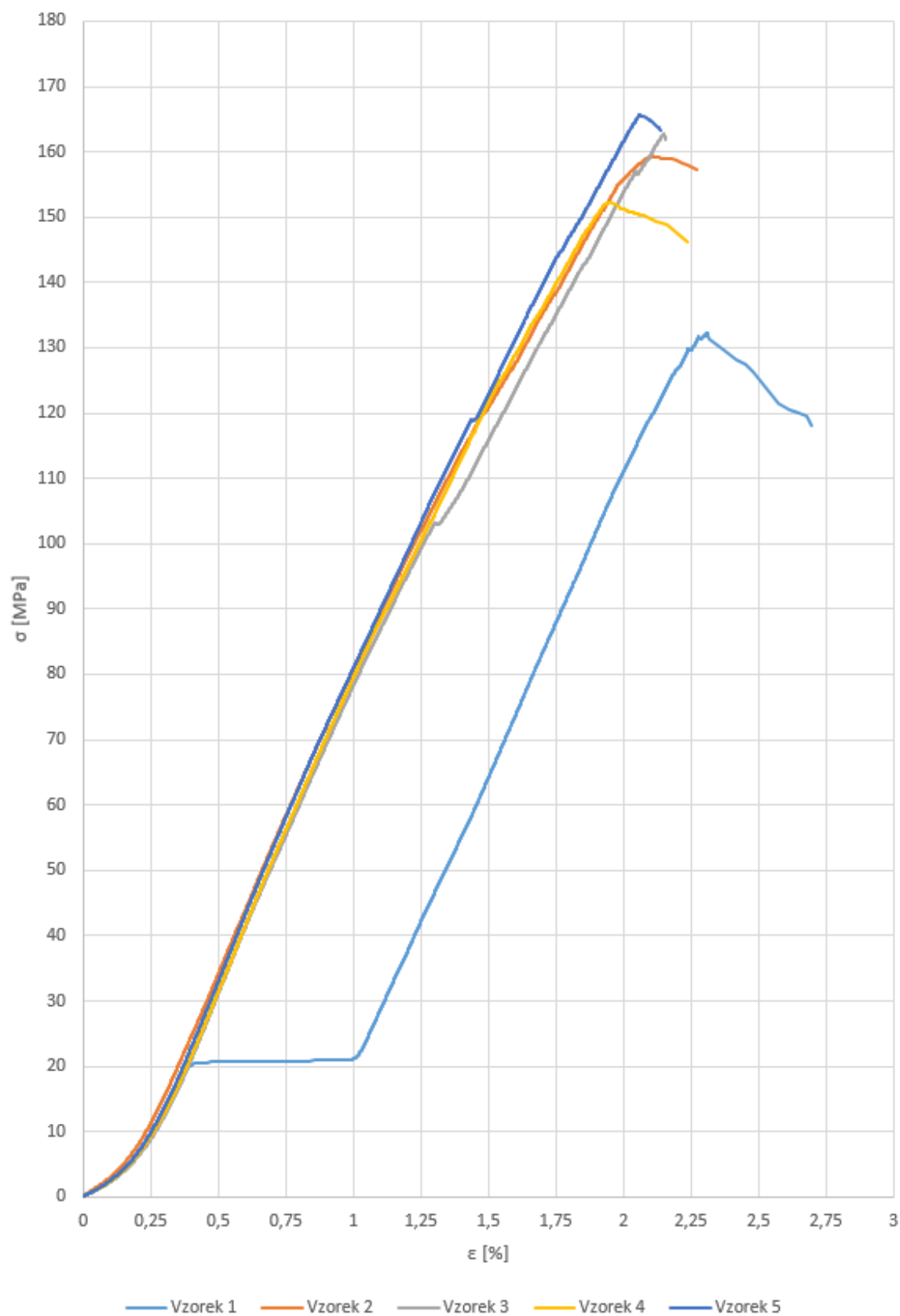
Obrázek 0.4: Graf napětí ku prodloužení pro vadu kompozitu s červíky

Graf napětí ku prodloužení pro velkoplošné poškození červíky



Obrázek 0.5: Graf napětí ku prodloužení pro vadu kompozitu s velkoplošným poškozením červíky

Graf napětí ku prodloužení pro vadu kompozitu neprosycením



Obrázek 0.6: Graf napětí ku prodloužení pro vadu kompozitu s neprosycením

Technical Data Sheet

Elastolit® R 8819/104/LT

Page 1 / 3
Version 03
Date of issue: 07.08.2013



Application

This system is used for production of structural parts in RTM processing.

Chemical Characteristics

Polyol-Component: Preparation based on: polyol, catalyst, stabilizing agents
Iso-Component: Preparation based on: carbodiimide, 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate;
diphenylmethane-4,4'-diisocyanate = IsoMMDI 92050

Supply

The type of supply for the components will be decided after consultation with our Sales Office

Storage, Preparation

Polyurethane components are moisture sensitive. Therefore they must be stored at all times in sealed, closed containers. The A-component (Polyol) must be homogenised by basic stirring before processing. More detailed information should be obtained from the separate data sheet entitled "Information for in-coming material control, storage, material preparation and waste disposal" and from the component data.

Possible Hazards

The B-component (Isocyanate) irritates the eyes, respiratory organs and the skin. Sensitisation is possible through inhalation and skin contact. MDI is harmful by inhalation. On processing these, take note of the necessary precautionary measures described in the Material Safety Data Sheets (MSDSs). This applies also for the possible dangers in using the A-component (Polyol) as well as any other components. See also our separate information sheet "Safety- and Precautionary Measures for the Processing of Polyurethane Systems." Use our Training Programme "Safe Handling of Isocyanate."

Waste Disposal

More detailed information is provided in our country-specific pamphlet

Consumer articles, medical products

There are national and international laws and regulations to consider if it is intended to produce consumer articles (eg articles that necessitate food or skin contact, toys etc.) or medical objects out of BASF Polyurethanes GmbH products. Where these do not exist, the current legal requirements of the European Union for consumer articles as well as medical products should be sufficient. Consultation with our Sales Office and our Ecology and Product Safety Department is strongly recommended.

Elastolit® R 8819/104/LT

Page: 2 / 3
Version: 03
Date of Issue: 07.08.2013



Component Data

Characteristics	Unit	Polyol-Comp	Iso-Comp.	Method
Density (25°C)	g/cm³	1.05	1.22	G 133-08
Viscosity (25°C)	mPa·s	216	40	G 133-07
Shelf-life	months	3	6	

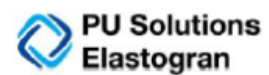
Typical Processing Data

Cup Test

Characteristics	Unit	Value	Method
Component temperature	°C	20	
Weights	g	A = 100 B = 178	
Cream time	s	480	G 132-01
Free rise density	kg/m³	1000	

Machine processing

Characteristics	Unit	Value	Method
Gel time	s	45	
Demoulding time	min.	<4	
Component temperature	°C	45	
Mould temperature	°C	90	



Elastolit® R 8819/104/LT

Page: 3 / 3
Version: 03
Date of Issue: 07.08.2013



Typical Physical Properties

Characteristics	Unit	Measured value	Method
Density	kg/m ³	1170	DIN EN ISO 1183-1
Shore hardness D		83	DIN 53505
Tensile strength	N/mm ²	77	DIN EN ISO 527
Elongation at break	%	6	
Flexural modulus at + 23 °C	N/mm ²	2420	DIN EN ISO 178
Flexural strength	N/mm ²	105	
Heat distortion temperature B	°C	110	DIN EN ISO 75
Shrinkage	%	0.9	

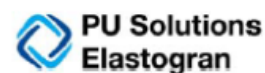
Mechanical properties of neat PU system, no post curing.

® = registered trade mark of BASF

The data contained in this document as well as advice or other support services are based on our current knowledge and experience. In view of many factors that may affect processing and application of our products, this data does not relieve processors from carrying out their own investigations and tests, particularly with regards to the suitability of the goods supplied for the processes and purposes they intend to use them for; neither does this data imply any guarantee of certain properties, or the suitability of the product for a specific purpose. Any descriptions, drawings, photographs, data, proportions, weights, measured values etc. given herein may change without prior notice and do not constitute the agreed contractual quality of the product. It is the responsibility of the recipient of our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed.

BASF Polyurethanes GmbH
Postfach 1140
49440 Lemförde
Germany

Tel.: +49 (0) 5443/12-0
Fax: +49 (0) 5443/12-2020
Mail: pu-spezialsysteme@basf.com
Internet: www.pu.basf.eu





DIPEX, s.r.o.
Niklová ulica 2178/1
926 13 Sereď
Slovakia

Technical data sheet

Reference: kpz

Product name: KP 1200-2540mm

Product group: Complex stitched fabric of two layers of 90°axis skewed to +-45° .

PRODUCT SPECIFICATION

Ply sequence	Unit	+45°	-45°	CSM	Stitching 1	Stitching 2 including	Total	
Areal weight	g/m2	594	594	-	2	22	1212	+/-5%
Raw material	tex	2400	2400	-	113 dtex	167 dtex	-	
	type	E-glass	E-glass	-	PES	PES	-	
	Sizing	JM 086		-			-	

Total product width: mm Roll length: 100 Im

Internal tube diameter: 1270 mm 76, 152 mm

Total square weight :	1212	g/m ²	Stitch Gauge 1:	E03	
Nominal roll lenght:	100	m	Stitch Gauge 2:	E03	
Stich type 1:	FRANSE		Stitch length 1:	5,7	mm
Stich type 2:	TRIKOT		Stitch length 2:	4,2	mm
Short rolls acceptance:					